

**ÉCIO JOSÉ MOLINARI**

**REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS NATURAIS  
PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS  
COM MATRIZ TERMOFIXA NA MANUFATURA DE PEDRAS  
INDUSTRIAIS**

**Florianópolis,  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS**

**Écio José Molinari**

**REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS NATURAIS  
PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS  
COM MATRIZ TERMOFIXA NA MANUFATURA DE PEDRAS  
INDUSTRIAIS**

**Florianópolis,  
2007**

**ÉCIO JOSÉ MOLINARI**

**REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS NATURAIS  
PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS  
COM MATRIZ TERMOFIXA NA MANUFATURA DE PEDRAS  
INDUSTRIAIS**

**Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais da Universidade  
Federal de Santa Catarina, como requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre  
em Ciência e Engenharia de Materiais.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Antonio  
Francisco Machado**

**Florianópolis  
2007**

**“REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS NATURAIS PARA O  
DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS COM MATRIZ  
TERMOFIXA NA MANUFATURA DE PEDRAS INDUSTRIAIS”**

por

**Écio José Molinari**

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Materiais**, área de concentração de **Polímeros**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Ricardo Antonio Francisco Machado, Dr. Ing.  
Orientador

---

Prof. Ana Maria Maliska, Dr  
Coordenador do PGMAT

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Alfredo Tibúrcio Nunes Pires, Dr. Ing.

---

Prof. Ariovaldo Bolzam, Dr. Ing.

---

Prof. Daniela Becker, Dr. Ing.

**Florianópolis, Setembro de 2007.**

*“A vida é bela, é só saber viver”.*

*Autor desconhecido*

## AGRADECIMENTOS

A Deus,  
Aos meus pais,  
A filha Débora Regina,  
À minha esposa Maria Araci,

À família Molinari – aos meus irmãos – que sempre valorizaram os estudos.

Aos meus sobrinhos e primos – continuem estudando porque este é o bem mais precioso que um homem pode ter.

Aos meus colegas de trabalho, pelo grande apoio durante toda a fase da dissertação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Antônio Francisco Machado pela dedicação, apoio e orientação.

Ao amigo Jackson Miranda por toda a ajuda prestada no desenvolvimento do trabalho.

A amiga Prof. Msc, Denise Santos Conti que não mediu esforços em me ajudar nas várias análises e desenvolvimento deste trabalho. Milhões de agradecimentos. Você é muito inteligente.

À UFSC por conceder o meu ingresso no Mestrado. A todos os professores da UFSC e direção do PGMAT, obrigado pela paciência.

Ao Prof. Msc Adriano F. Reinert pelo grande apoio desde o meu ingresso no Mestrado até a conclusão do trabalho.

A Prof. Msc Palova, que sempre torceu e confiou na minha vitória nesta caminhada científica.

A Prof. Dra, Msc Daniela Becker, que me mostrou a direção dos caminhos para a melhoria do meu trabalho. Obrigado, você foi dez.

Aos Profs. Msc Balzer, Msc Rogério Araújo, Msc Gilapa, Msc Nivaldo, Gualter, César, Msc Inêz, Marcelli, Marcelo, Joel, Romeu (todos da Sociesc) que sempre torceram pela minha vitória nesta conquista, e não mediram esforços quando precisei de suas ajudas. Muito obrigado pessoal.

Ao amigo Prof. Msc Iberê, que me ajudou com as dificuldades na informática.

À empresa Ara Química pela doação dos materiais Resinas, através da amiga Marcia pelo apoio na realização do trabalho.

À empresa Ciba pela doação dos materiais aditivos, através da amiga Maria Aparecida Campos pelo apoio na realização do trabalho.

Aos amigos Prof. Msc Francisco Germano Martins e Sua Esposa Teresinha- (Sociesc), pela realização de alguns experimentos, e pelo apoio prestado.

Ao Prof. Msc. Alexsandro Fossile pelo envolvimento e apoio motivacional no desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Marmoraria Dalsasso, em nome de Marcio José Dalsasso e Fernando Fossile pelo apoio e acreditarem neste trabalho. Sem esta contribuição , vocês seria impossível a realização desta obra. Agradecimentos especiais.

Ao amigo Msc. Gerson (UFSC) pelo apoio no trabalho.

Aos meus ex-alunos da turma MA 140/2005 (Elias Pedro de Oliveira, Juliano Costa, Micheli Pereira, Natiele L. K. Tomimatsu, Pâmela Tomazelli, André Alexandre Baumann, Diogo Felipe Kretzer, Fernanda Janine do Amaral, Geovani Ferreira Cesconetto, Jacson Alexsandre Lipinki e Marja Helena Santos) pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que ficaram esquecidos no coração.☺

A Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC, pela excelente infra-estrutura que possibilitou o desenvolvimento desta obra e toda a confiança prestada.

## RESUMO

A indústria de materiais poliméricos, principalmente os fabricantes de *commodities* tem procurado valorizar seus produtos em busca de alternativas inovadoras para a fabricação de produtos acabados. Por outro lado aquelas empresas que exploram e comercializam rochas ornamentais, como mármore e granitos, enfrentam dificuldades no aproveitamento de 100% da sua matéria prima tomando-se, como exemplo, a quantidade de 1m<sup>3</sup> de mármore, estudos indicam que apenas 75% destes materiais tornam-se produtos acabados enquanto o restante é descartado como rejeito, seguindo (ou descartado) para aterros. A junção de conhecimentos oriundos de duas áreas distintas: materiais orgânicos (poliméricos) e materiais inorgânicos (minerais) possibilitam o uso das características intrínsecas dos polímeros que permitem a incorporação de cargas inorgânicas proporcionando a obtenção de produtos acabados com características diferenciadas com elevada resistência mecânica, resistências à flexão, etc. Neste trabalho mostra-se uma metodologia para a reciclagem de rejeitos de minerais onde se utiliza granito e mármore, materiais associados a resinas poliméricas de poliéster e acrílica para a obtenção de compósitos com matriz polimérica possibilitando uma correta destinação aos rejeitos descartados pelas marmorarias, com agregação de valor ao produto obtido e a possibilidade de geração de uma nova cadeia de negócios.

Os compósitos obtidos neste trabalho foram caracterizados e suas propriedades foram comparadas com mármore e granitos “in natura”, apresentando propriedades superiores na maioria dos casos, mostrando a viabilidade técnica e econômica do processo (metodologia) apresentado neste trabalho.



## **ABSTRACT**

The industry of material polymeric, mainly the commodities makers have been trying to value its products in search of innovative alternatives for the production of products finishes. On the other hand those companies that explore and they market ornamental rocks, as marbles and granites, they face difficulties in the use of 100% of its matter it excels being taken, for example, 1m<sup>3</sup> of marble, it is considered that 75% become just product finish while the remaining is discarded as I reject, proceeding (or discarded) for embankments. The junction of knowledge originating from of two different areas: organic materials (polymers) and inorganic materials (minerals) they facilitate the use of the knowledge that the polymeric ones allow the use of inorganic loads using the obtaining of products finishes with characteristics differentiated with high mechanical resistance, resistances the flexure, etc. In this work it is used granite and material marble associated to resins polymeric of polyester and acrylic for the obtaining of a composite of polymeric facilitating a correct destination to the garbage discarded by the marble industry, with aggregation of value to the obtained product and the possibility of generation of a new chain of business.

The composites obtained in this work were characterized and its properties were compared with marbles and granites "in natural", presenting superior properties in most of the cases, showing the technical and economic viability of the process presented in this work

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Etapas de fabricação da pedra tecnológica (compósito de pedra), desenvolvida pela Compac Marmol e Quartz company. Adaptado de COMPAC MARMOL E QUARTZ (2006).....	39
<b>Figura 2.2.</b> Etapa de compactação por vibra compressão a vácuo, mostrando as pequenas partículas acomodando-se entre as grandes partículas. Adaptado de CAESARSTONE (2007). ....	40
<b>Figura 3.1.</b> Etapas experimentais dos compósitos de Resina Poliéster com Granito Caju.....	46
<b>Figura 3.2.</b> Etapas experimentais de caracterização das pedras sintéticas – Pedra 1 e Pedra 2.....	47
<b>Figura 3.3.</b> Etapas experimentais relativas aos compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju e com Mármore Branco.....	47
<b>Figura 3.4.</b> Ensaio de resistência à compressão (corpo de prova sendo rompido).....	54
<b>Figura 3.5.</b> Ensaio de resistência à flexão em três pontos.....	55
<b>Figura 4.1.</b> Aparência visual dos compósitos de resina poliéster com granito Caju....	60
<b>Figura 4.2.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina poliéster com granito Caju obtido por compressão. ....	61
<b>Figura 4.3.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina poliéster com granitos Caju obtidos por compressão.....	63
<b>Figura 4.4.</b> Região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1, (escala 1 mm, aumento de 50x).....	65
<b>Figura 4.5.</b> Características das medidas da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da Pedra 1.....	66
<b>Figura 4.6.</b> Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões pedra sintética – Pedra 1. ....	66
<b>Figura 4.7.</b> Região de partículas com menores dimensões da pedra sintética – Pedra 1, (escala 200 µm, aumento de 200x).....	67
<b>Figura 4.8.</b> Características das medidas da região de partículas com menores dimensões da Pedra 1 .....	67
<b>Figura 4.9.</b> Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de menores dimensões da pedra sintética – Pedra 1. ....	68
<b>Figura 4.10.</b> Região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1. Método tridimensional (escala 1 mm, aumento de 13,4x). ....	68
<b>Figura 4.11.</b> Características das medidas da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da Pedra 1. Método tridimensional. ....	69

<b>Figura 4.12.</b> Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1. Método tridimensional.....	69
<b>Figura 4.13.</b> Variações granulométricas da Pedra 1 observadas em microscopia óptica.....	70
<b>Figura 4.14.</b> Região 1 da variação granulométrica da pedra sintética – Pedra 2, ..... (escala 200 µm, aumento de 200x).....	70
<b>Figura 4.15.</b> Características das medidas das granulometrias da região 1 da pedra sintética – Pedra 2 .....	71
<b>Figura 4.16.</b> Região 2 da variação granulométrica da pedra sintética – Pedra 2, ..... (escala 1mm, aumento de 50x).....	71
<b>Figura 4.17.</b> Características das medidas das granulometrias da região 2 da pedra sintética – Pedra 2. ....	71
<b>Figura 4.18.</b> Variações granulométricas da Pedra 1 obtidas no ensaio de distribuição granulométrica. ....	73
<b>Figura 4.19.</b> FTIR de 4000-400 cm <sup>-1</sup> da resina polimérica da pedra sintética - Pedra 1. ....	74
<b>Figura 4.20.</b> FTIR de 4000-400 cm <sup>-1</sup> da resina polimérica de Poliéster. ....	75
<b>Figura 4.21.</b> Resina poliéster ortoftálica. Fonte: Resana S.A. (1992). ....	76
<b>Figura 4.22.</b> FTIR de 4000-400 cm <sup>-1</sup> da resina polimérica acrílica.....	76
<b>Figura 4.23.</b> Representação da unidade monomérica do ácido metacrílico.....	77
<b>Figura 4.24.</b> Aparência visual dos compósitos de resina acrílica com granito Caju. ....	78
<b>Figura 4.25.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão. ....	79
<b>Figura 4.26.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.....	81
<b>Figura 4.27.</b> Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.....	83
<b>Figura 4.28.</b> Gráfico da distribuição granulométrica das partículas de mármore branco utilizadas nos compósitos com resina acrílica.....	85
<b>Figura 4.29.</b> Aparência visual dos compósitos de resina acrílica com mármore branco. ....	86
<b>Figura 4.30.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco obtidos por compressão.....	87
<b>Figura 4.31.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão. ....	89

<b>Figura 4.32.</b> Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão. ....	90
<b>Figura 4.33.</b> Superfície do CP de compressão de granito natural Caju durante a degradação em radiação UV. ....	91
<b>Figura 4.34.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-1 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.....	92
<b>Figura 4.35.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-3 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.....	93
<b>Figura 4.36.</b> Superfície do CP de ..... 94	
flexão do Compósito-6 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV. ....	94
<b>Figura 4.37.</b> Superfície do CP de flexão do Compósito-9 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV. ....	94
<b>Figura 4.38.</b> Superfície do CP de compressão de mármore natural durante a degradação em radiação UV. ....	95
<b>Figura 4.39.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-1 (resina acrílica com mármore Branco e sem estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV. ....	95
<b>Figura 4.40.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-3 (resina acrílica com mármore Branco e com estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV. ....	96
<b>Figura 4.41.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-4 (resina acrílica com mármore Branco e sem estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV. ....	96
<b>Figura 4.42.</b> Superfície do CP de compressão do Compósito-6 (resina acrílica com mármore Branco e com estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV. ....	97
<b>Figura 4.43.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão após a Degradação em Radiação UV.....	98
<b>Figura 4.44.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, após a Degradação em Radiação UV.....	99
<b>Figura 4.45.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, após a Degradação em Radiação UV.....	100
<b>Figura 4.46.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco após Degradação em Radiação UV.....	101
<b>Figura 4.47.</b> Comparativos das resistências à compressão dos Compósitos de resina acrílica com granito caju, antes e após Degradação em Radiação UV.....	102

<b>Figura 4.48.</b> Comparativos das resistências à flexão dos Compósitos de resina acrílica com granito caju, antes e após Degradação em Radiação UV. ....	102
<b>Figura 4.49.</b> Comparativos das resistências à compressão dos Compósitos de resina acrílica com mármore Branco, antes e após Degradação em Radiação UV. ....	103
<b>Figura 4.50.</b> Comparativos das resistências à flexão dos Compósitos de resina acrílica com mármore Branco, antes e após Degradação em Radiação UV. ....	103
<b>Figura G.1.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 1 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.....	130
<b>Figura G.2.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 2 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.....	131
<b>Figura G.3.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 3 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.....	132

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Propriedades de diferentes concretos poliméricos (compósitos).....	31
<b>Tabela 2.2.</b> Especificações técnicas de pedras sintéticas.....	41
<b>Tabela 2.3.</b> Comparações entre as pedras sintéticas sobre as pedras naturais. Adaptado de CAESARSTONE (2007). ....	41
<b>Tabela 2.4.</b> Intensidade de radiação global. ....	43
<b>Tabela 3.1.</b> Especificações dos materiais.....	45
<b>Tabela 3.2.</b> Distribuição granulométrica das partículas de granito Caju para serem utilizadas nos compósitos com resina acrílica.....	50
<b>Tabela 3.3.</b> Formulações dos compósitos de resina acrílica com granito Caju. ....	51
<b>Tabela 3.4.</b> Formulações dos compósitos de resina acrílica com mármore branco. ..	53
<b>Tabela 4.1.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina com granitos Caju obtidos por compressão.....	61
<b>Tabela 4.2.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina poliéster com granitos Caju obtidos por compressão.....	63
<b>Tabela 4.3.</b> Características das bandas de FTIR da resina polimérica da pedra sintética - Pedra 1.....	74
<b>Tabela 4.4.</b> Características das bandas de FTIR da resina polimérica de poliéster. ....	75
<b>Tabela 4.5.</b> Características das bandas de FTIR da resina acrílica. ....	77
<b>Tabela 4.6.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão. ....	79
<b>Tabela 4.7.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.....	81
<b>Tabela 4.8.</b> Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.....	83
<b>Tabela 4.9.</b> Distribuição granulométrica das partículas de mármore branco utilizadas nos compósitos com resina acrílica .....	85
<b>Tabela 4.10.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco obtidos por compressão.....	86
<b>Tabela 4.11.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão. ....	88
<b>Tabela 4.12.</b> Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão. ....	90
<b>Tabela 4.13.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão, após a Degradação em Radiação UV .....	97

<b>Tabela 4.14.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju após a Degradação em Radiação UV.....	98
<b>Tabela 4.15.</b> Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco após a Degradação em Radiação UV.....	100
<b>Tabela 4.16.</b> Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco após Degradação em Radiação UV.....	101
<b>Tabela A.1.</b> Dados de análises técnicas da resina poliéster ortotereftálica Arazyn®.	115
<b>Tabela B.1.</b> Dados de análises técnicas da resina acrílica Polaris®.....	116
<b>Tabela E.1.</b> Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº1 da pedra sintética – Pedra 1.....	121
<b>Tabela E.2.</b> Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº2 da pedra sintética – Pedra 1.....	121
<b>Tabela E.3.</b> Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº3 da pedra sintética – Pedra 1.....	122
<b>Tabela F.1.</b> Custo por metro quadrado de compósitos com mineral granito e resina poliéster.....	128
<b>Tabela G.1.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 1 da pedra sintética - Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas. ....	129
<b>Tabela G.2.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 2 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.....	130
<b>Tabela G.3.</b> Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 3 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%M <sub>frc</sub>	Porcentagem de massa final de resina no compósito
ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American society for Testing and Materials
CEMP	Comissão de estudo das matérias primas
CP	Corpo de provas
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ISO	International Organization for Standardization
IV	Infravermelho
L1	Tamanho da partícula na posição 1 da distribuição granulométrica
L2	Tamanho da partícula na posição 2 da distribuição granulométrica
L3	Tamanho da partícula na posição 3 da distribuição granulométrica
L4	Tamanho da partícula na posição 4 da distribuição granulométrica
L5	Tamanho da partícula na posição 5 da distribuição granulométrica
L6	Tamanho da partícula na posição 6 da distribuição granulométrica
M <sub>amostra</sub>	Massa da amostra
M <sub>amostra queimada</sub>	Massa da amostra queimada
M <sub>cac</sub>	Massa do compósito após cura
M <sub>cadinho</sub>	Massa do cadinho
MEK	Metil-etil-cetona
M <sub>ppc</sub>	Massa perdida no processamento do compósito
M <sub>RAQ</sub>	Massa resultante da amostra queimada
M <sub>frc</sub>	Massa final de resina no compósito
PC	Policarbonato
PET	Poli(tereftalato de etileno)
R-UV	Radiação ultravioleta
UV	Ultravioleta



## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_0$	Intensidade da radiação incidente
$I$	Intensidade da radiação transmitida
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\sigma_f$	Tensão de flexão
$A$	Absorbância
$A$	Área do corpo de prova
$b$	Espessura da camada do material
$b$	Largura do corpo de prova
$c$	Concentração do componente que está absorvendo a radiação.
$E_1$	Estado energético inicial da molécula
$E_2$	Estado energético final da molécula
$F$	Força máxima até o rompimento do corpo de prova
$h$	Espessura do corpo de prova
$L$	Distância entre as bases de apoio do corpo de prova
$T$	Transmitância
$T_d$	Temperatura de decomposição térmica
$T_g$	Glass ransition temperature, temperatura de transição vítrea
$T_m$	Temperatura de fusão
$h$	Constante de Planck
$\bar{\nu}$	Número de ondas
$\epsilon$	Absortividade molar do componente que está absorvendo a radiação
$\nu$	Frequência da luz absorvida
$\lambda$	Comprimento da onda da luz monocromática
$\phi$	Rendimento quântico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>COMPÓSITOS.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>INTERAÇÃO ENTRE MATERIAIS POLIMÉRICOS E INORGÂNICOS NO DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>RECICLAGEM.....</b>	<b>33</b>
2.3.1	Necessidade de uma Metodologia para a Reciclagem.....	33
2.3.2	A Reciclagem como Desenvolvimento Sustentável.....	34
2.3.3	Reaproveitamento de Rochas Naturais.....	37
<b>2.4</b>	<b>A PRODUÇÃO DE PEDRAS SINTÉTICAS.....</b>	<b>37</b>
<b>2.5</b>	<b>CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE PEDRA COM POLÍMERO.....</b>	<b>41</b>
<b>2.6</b>	<b>DURABILIDADE DOS POLÍMEROS.....</b>	<b>42</b>
2.6.1	Degradação Por Radiação Ultravioleta.....	42
<b>2.7</b>	<b>ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR.....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS EMPREGADOS.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>ETAPAS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA POLIÉSTER COM GRANITO CAJU.....</b>	<b>48</b>
3.3.1	Obtenção das Partículas de Granito Caju.....	48
3.3.2	Obtenção dos Compósitos com resina poliéster via Processo de Compressão... .....	48
<b>3.4</b>	<b>PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU.....</b>	<b>49</b>
3.4.1	Obtenção das Partículas de Granito Caju.....	49
3.4.2	Obtenção dos Compósitos com Resina Acrílica via Processo de Compressão	49

<b>3.5</b>	<b>PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM MÁRMORE .</b>	<b>52</b>
3.5.1	Obtenção das Partículas de Mármore Branco .....	52
3.5.2	Obtenção dos Compósitos via Processo de Compressão .....	53
<b>3.6</b>	<b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....</b>	<b>54</b>
3.6.1	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão .....	54
3.6.2	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão .....	54
3.6.3	Ensaio de Microscopia Óptica .....	55
3.6.4	Ensaio de Teor de Cinzas .....	56
3.6.5	Ensaio de Distribuição Granulométrica.....	56
3.6.6	Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	57
3.6.7	Ensaio de absorção de água.....	57
3.6.8	Ensaio de Degradação através de Radiação UV.....	58
<b>3.7</b>	<b>ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....</b>	<b>58</b>
3.7.1	Viabilidade Econômica de Compósitos com Resinas Termofixas com Mineral Granito e Mármore.....	58
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>COMPÓSITOS DE RESINA POLIÉSTER COM GRANITO CAJU.....</b>	<b>60</b>
4.1.1	Processamento por Compressão e Aparência Visual dos Compósitos.....	60
4.1.2	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão .....	61
4.1.3	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão .....	63
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DAS PEDRAS SINTÉTICAS .....</b>	<b>65</b>
4.2.1	Ensaio de Microscopia Óptica na Pedra Sintética – Pedra 1 .....	65
4.2.2	Ensaio de Microscopia Óptica na Pedra Sintética – Pedra 2 .....	70
4.2.3	Ensaio de Teor de Cinzas na Pedra Sintética – Pedra 1 .....	72
4.2.4	Ensaio de Distribuição Granulométrica das Partículas Minerais da Pedra Sintética – Pedra 1 .....	72
4.2.5	Ensaio de FTIR na Resina Polimérica da Pedra Sintética - Pedra 1.....	73

<b>4.3</b>	<b>COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU.....</b>	<b>78</b>
4.3.1	Aparência Visual dos Compósitos .....	78
4.3.2	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão .....	78
4.3.3	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão .....	81
4.3.4	Ensaio Absorção de Água .....	83
<b>4.4</b>	<b>COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM MÁRMORE BRANCO .....</b>	<b>84</b>
4.4.1	Distribuição Granulométrica das partículas de Mármore Branco .....	84
4.4.2	Aparência Visual dos Compósitos .....	86
4.4.3	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão .....	86
4.4.4	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão .....	88
4.4.5	Ensaio Absorção de Água .....	89
<b>4.5</b>	<b>ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU E MÁRMORE BRANCO ATRAVÉS DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....</b>	<b>91</b>
4.5.1	Aparência Visual dos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju .....	91
4.5.2	Aparência Visual dos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco... 94	
4.5.3	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão nos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju após a Degradação em Radiação UV .....	97
4.5.4	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão nos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju após a Degradação em Radiação UV .....	98
4.5.5	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão nos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco após a Degradação em Radiação UV .....	99
4.5.6	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão nos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco após a Degradação em Radiação UV .....	100
4.5.7	Análises do Estudo da Degradação em Radiação UV dos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju e Mármore Branco .....	101
<b>4.6</b>	<b>RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>105</b>
4.6.1	Viabilidade Econômica de Compósitos com Resinas Termofixas com Mineral Granito e Mármore.....	105
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>106</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE - A .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE - B .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE - C .....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE - D .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE - E.....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE - F.....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE - G .....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No final do século XX surgiram os movimentos relacionados com a preocupação do meio ambiente, onde a reciclagem passa a ser motivo de ação estratégica para prolongar a vida dos recursos não renováveis MEDINA (2006). Analisando o cenário sócio-econômico, percebe-se que a indústria do setor mineral, tem como prioridade atender as legislações do meio ambiente, e entre as ações já tomadas surgiram os desenvolvimentos de novos materiais, principalmente na linha de compósitos, formando os produtos conhecidos por granito ou mármore sintéticos (BRETON COMPANY, 2006, COMPAC MARMOL E QUARTZ, 2006 e CAESARSTONE, 2007).

A indústria de mármore e granitos se dedica à exploração e beneficiamento de rochas ornamentais, processo este conhecido pelo termo “lavra” VALE (2001), que “entende-se pelo conjunto de operações coordenadas, objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração das substâncias minerais úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas”. Esta exploração envolve blocos em bruto até o desdobramento de chapas semi-acabadas como ladrilhos para revestimentos, colunas, esculturas, etc.

Apesar da potencialidade das reservas e de sua grandiosidade, o parque industrial brasileiro apresenta um inegável atraso tecnológico se comparado a outros países produtores, não atingindo níveis de produtividade e qualidade no seu processo produtivo. Em consequência desse atraso são pequenas as preocupações em se conter os desperdícios com os materiais e em recuperá-los de alguma forma. Em face disso, o baixo custo agregado às pedras exportadas não permite um fluxo de divisas expressivo para o país, mesmo tendo condições favoráveis para tal, outros países produtores de mármore e granitos possuem um avanço tecnológico mais expressivo e já produzem e exportam pedras sintéticas para o Brasil (MACHADO *et al.*, 2002).

Diante do que foi exposto anteriormente, CALDERONI (2003) ressalta que: “o lixo é um material mal amado. Todos desejam dele descartar-se. Até pagam para dele se verem livres”. O autor comenta ainda que o lixo é um subproduto que é gerado continuamente, e “amar o próprio lixo é simplesmente uma questão de amor próprio”. Desta lição podemos angariar as evoluções tecnológicas, onde foi destacada anteriormente a indústria de pedras ornamentais que buscou a alternativa tecnológica de unir materiais como o plástico à pedra, de características técnicas em uma primeira

análise extremamente oposta, segundo a visão de leigos, para o desenvolvimento de compósitos com concepções embasadas na reciclagem.

Visualizando estatisticamente a realidade do Brasil, no segmento mineral segundo CHIODI (2006), as exportações brasileiras de rochas ornamentais somaram US\$ 474,11 milhões no período do primeiro semestre de 2006, com uma variação positiva de 36,34% no faturamento frente ao mesmo período de 2005. Em volume físico, essas exportações de 2006 atingiram 1,17 milhões de toneladas, o que representou variação positiva de 15,47% frente ao mesmo período de 2005. De toda esta produtividade crescente, sabemos que a quantidade de subprodutos conhecidos por retalhos e pós (lamas) de mármore ou granitos, oriundos do beneficiamento destas é proporcional à produtividade. Então ocorre a necessidade da tecnologia no desenvolvimento de materiais compósitos de resíduos de pedras com polímeros. A fatia do mercado brasileiro na manufatura de pedras sintéticas não é evidenciada estatisticamente, talvez por motivos relacionados à falta de tecnologias para este produto que é recente no nosso mercado.

A utilização dos rejeitos de materiais de pedras para o desenvolvimento de rochas sintéticas, mostra vantagens na diminuição da quantidade de rejeito a ser descartada na natureza, além de agregar valor a um resíduo indesejável, e possibilita também a geração de novos empregos.

Este trabalho tem como objetivo geral associar o conhecimento da área de polímeros propondo uma solução para a reciclagem de resíduos gerados nas fases de beneficiamento de rochas ornamentais em marmorarias e/ou na etapa de exploração das rochas ornamentais (lavra), resultando um material compósito.

Como objetivos específicos desse trabalho podem-se destacar: (1) o estudo das condições viáveis do processo de compressão para a produção de compósito resina poliéster com a pedra natural Granito Caju; (2) avaliação das propriedades mecânicas de resistência à flexão e compressão dos compósitos produzidos com resina poliéster; (3) comparação do material desenvolvido com os similares existentes no mercado; (4) avaliação das propriedades mecânicas de compressão e flexão (antes e depois da degradação através de exposição à radiação UV) e a taxa de absorção de umidade do compósito de resina acrílica com as pedras naturais Granito Caju e Mármore Branco; (5) estudo estimativo da viabilidade econômica dos compósitos de resina termofixa com pedras naturais.

Este estudo foi motivado pela gigantesca quantidade de resíduos que são descartados nas marmorarias, oriundos da etapa de beneficiamento de rochas naturais, bem como na exploração (lavra) das rochas naturais.

Para melhor apresentação, este trabalho está dividido em partes. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para apoiar o estudo, apresentando os aspectos gerais relacionados aos materiais compósitos, as questões mostrando a preocupação com o setor de reciclagem. Inclui também uma abordagem sobre a degradação dos polímeros pela radiação ultravioleta. A descrição dos experimentos desenvolvidos encontra-se no capítulo 3. Os resultados obtidos, bem como a discussão desses, estão apresentados no capítulo 4. Por fim os apêndices.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 COMPÓSITOS

As tecnologias modernas exigem materiais com combinações de propriedades intrínsecas (materiais com baixa densidade, rígidos, fortes, com resistências a abrasão, ao impacto e a corrosão) que não podem ser encontradas nas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão ampliadas através do desenvolvimento de materiais compósitos (CALLISTER, 2002).

A conjugação de propriedades distintas em um único material pode ser obtida através da fabricação de materiais compósitos. Os materiais compósitos começaram a ser usados em larga escala a partir da primeira metade do século XX e atualmente são bastante empregados nas indústrias naval, aeroespacial, automobilística e eletrônica. A composição dos compósitos apresenta a combinação de materiais das classes dos metais, cerâmicos e polímeros, genericamente apresentando uma matriz e um reforço (HAGE JUNIOR, 1990).

Os compósitos constituem uma das classes de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não de polímeros, em que um dos componentes, descontínuo, proporciona a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial). Esses componentes não se dissolvem ou se descaracterizam completamente, mas atuam concentradamente, e as propriedades do conjunto são superiores às de cada componente individualmente (MANO, 1991 e AMICO, 2006)

Um compósito exhibe além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial. Uma prancha de surfe é um exemplo típico de um compósito onde fibras de vidro são embebidas em um polímero. O concreto que apresenta uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração pode formar um compósito com o aço, que tem boa resistência à tração (MOITA NETO, 2006). O material para ferramentas de corte denominado Cermet é um exemplo de compósito que apresenta uma matriz metálica maleável composta por cobalto, com a adição de partículas finas de um material cerâmico de elevada dureza, o carbeto de tungstênio. Estes compósitos com reforço de partículas cerâmicas são chamados de compósitos particulados e sua vantagem é a obtenção de propriedades isotrópicas, sendo adequados para aplicações onde o carregamento é tridimensional. Os materiais cerâmicos usados nestes compósitos são bastante variados, desde cerâmicos naturais, como granito,

quartzo e alumina, até outro como carboneto de tungstênio ou carbetto de silício, proporcionando elevadas dureza e resistência à abrasão (HAGE JUNIOR, 1990).

## 2.2 INTERAÇÃO ENTRE MATERIAIS POLIMÉRICOS E INORGÂNICOS NO DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS

O primeiro material usado pelo homem foi a madeira, posteriormente a pedra, depois os metais, a cerâmica, o vidro e finalmente os polímeros. No início do século XX, surgiram alguns materiais produzidos pela química que constituíam de moléculas gigantescas, que poderiam resultar do encadeamento de  $10^3$  ou mais átomos de carbono. Esses produtos de síntese apresentavam repetições de pequenas unidades estruturais em longa cadeia principal, chamadas assim de polímeros (MANO, 1991).

Pela evolução do uso dos materiais atualmente o homem encontra uma imensa variedade que podem ser distribuídas em dois grandes grupos: a) os materiais inorgânicos e b) os orgânicos. Partindo desta classificação este trabalho procura fazer um estudo da interligação entre estas duas classes de materiais, interagindo principalmente os materiais orgânicos como polímeros termorrígidos e inorgânicos pertencentes ao reino mineral, dentre eles os granitos e mármore, com a finalidade de obtenção de um novo material com propriedades mecânicas e características físicas superior aos seus constituintes.

A proposta do estudo visa buscar alternativas tecnológicas como, por exemplo, as questões comportamentais da interligação entre materiais como comenta CARNEVAROLO (2002) que quando se tem a distribuição de tensões uniformemente em uma matriz polimérica, a presença de uma segunda fase dispersa nessa matriz também resistirá à solicitação aplicada no conjunto. Isto significa dizer, por exemplo, que se o módulo de elasticidade da segunda fase for maior que o da matriz, o resultado final será um aumento nas propriedades mecânicas do sistema conjugado, principalmente o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento ou ruptura. Essa ação de mistura entre materiais é muito utilizada comercialmente para melhorar o desempenho mecânico de polímeros e permitir sua utilização em aplicações onde os polímeros puros poderiam apresentar o grande risco de falhar.

SMITH (2000) comenta que uma das classes de resinas muito empregadas no desenvolvimento de compósitos são as resinas poliéster insaturadas, onde estas podem formar ligações cruzadas dando consistências a estes tipos de materiais. As resinas poliéster insaturadas são materiais com baixa viscosidade, susceptíveis de serem misturadas com grandes quantidades de materiais de enchimento e de reforço.

Por exemplo, os poliésteres insaturados podem ser reforçados com fibra de vidro, cujo teor pode atingir 80% em peso.

A resina poliéster no caso mencionada anteriormente com a característica particular de permitir misturar materiais inorgânicos como enchimento, chama a atenção para proporcionar alternativas de agregar valor aos rejeitos de mármore e granitos resultantes das etapas de beneficiamento e exploração destas rochas ornamentais. Segundo DALSSASSO; MARCIO JOSÉ, da marmoraria Dalssasso Ltda em Joinville – SC, comenta que cerca de 15% a 20% de uma laje de granito ou mármore na fase de beneficiamento pode ser rejeito (cortes, aparas e pó do polimento).

Segundo MOREIRA *et al.* (2003) e MIRANDA *et al.* (2002) os estados produtores de pedras ornamentais que mais se destacam são: ES, BA, MG, CE, MS, SP, e RJ. O estado do Espírito Santo é responsável por cerca de 80% da produção nacional. Em um estudo na cidade de Cachoeiro do Itapemirim – ES estimou-se a ordem de 400 t/mês de resíduo de rochas ornamentais somente na forma de pós (ou lamas) provenientes da etapa de serragem dos blocos de pedras, ou seja, 20 a 25% do beneficiamento de um bloco são rejeitos na forma de pós. Estudos foram desenvolvidos por MOREIRA *et al.* (2003) incorporando este tipo resíduo na fabricação de produtos de cerâmica vermelha (tijolos, blocos de cerâmica e telhas). Os resultados mostraram que as possibilidades são viáveis e a dependência do bom desempenho final do produto está relacionada ao processo de sinterização. Reforça também MOTHÉ *et al.* (2005) que os rejeitos na forma de pó das rochas de granito e mármore são fontes para materiais cerâmicos, com possibilidades de maiores ou menores resistência dependendo da temperatura de sinterização, comparados ao “granito rosa bavena” denominado na cidade de Castelo no ES.

Percebe-se então que as reciclagens de rejeitos de rochas ornamentais estão muito focadas na incorporação de produtos cerâmicos. Porém o desenvolvimento de pedras sintéticas, compósitos com matriz polimérica, não é tão incidente, levando-se em conta que estes resíduos na forma de pó ou grânulos podem ser aplicados na confecção de pedras sintéticas, principalmente devido à característica comentada anteriormente da possibilidade de incorporar as partículas inorgânicas em uma matriz polimérica termorrígida.

Os materiais de enchimento ou cargas são adicionados aos polímeros para melhorar o limite de resistência à tração e à compressão, a resistência à abrasão, tenacidade, estabilidade dimensional e térmica, além de outras propriedades. Os materiais usados como enchimentos particulados incluem a farinha de madeira (pó de madeira), partículas de sílica, argila, o talco, o calcário e até mesmo alguns polímeros

sintéticos. Os tamanhos de partículas variam desde 10nm até dimensões macroscópicas (CALLISTER, 2002 e BRYDSON, 1999).

Nos últimos anos várias pesquisas têm sido intensificadas sobre o uso de cargas de enchimento em polímeros, bem como, o uso de cargas de dimensões nanométricas como elementos de reforços em compósitos de matriz polimérica. NETO *et al.* (2007) desenvolveram compósitos poliméricos tendo como matriz uma poliuretana derivada do óleo de mamona e, com reforço, sistemas híbridos constituídos de fibras vegetais (juta) e de carga mineral nanoparticuladas (bentonitas). Tanto a matriz quanto as fibras utilizadas provêm de fontes renováveis de matéria prima enquanto a carga mineral empregada foi uma argila de grande importância na região da Paraíba. Os resultados indicaram que a incorporação de fibra de juta à matriz poliuretana promoveu melhora significativa na propriedade de tração dos compósitos. A adição de pequenos teores de argila à matriz alterou o desempenho mecânico dos compósitos, ficando inferiores aos esperados. O compósito híbrido poliuretano/argila/fibra de juta, apresentou propriedades mecânicas superiores às dos compósitos reforçados unicamente com tecido de juta o que indicou sinergias entre os reforços híbridos argila/juta.

MENEZES *et al.* (2002) desenvolveram um estudo referente ao estado da arte sobre o uso de resíduos, onde perceberam que são três os principais motivos que levam os países a reciclar seus rejeitos industriais: a) o esgotamento das reservas de matéria prima confiável, b) o crescente volume de resíduos sólidos, que põem em risco a saúde pública, ocupam o espaço e degradam os recursos naturais e, c) a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pela alta do petróleo. A indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, isto em função de possuir um elevado volume de produção onde possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos. Dentre os vários resíduos, no estudo os autores também perceberam que os resíduos de mineração e beneficiamento de rochas são potenciais a causarem impacto ambiental quando descartados indiscriminadamente na natureza em função do grande volume. O elevado índice de crescimento do setor mineral, em especial ao de rochas ornamentais, apresenta um ponto negativo onde o desperdício pode chegar 50% em massa do total produzido. Este quadro preocupante tem levado a se repensar a forma de utilização dos resíduos minerais nas formulações de cerâmicas, onde são as principais aplicações (produção de tijolos, revestimentos e grês). Porém esta crise preocupante permitiu intensificar mais os estudos da incorporação destes resíduos como cargas em polímeros formando compósitos, principalmente por apresentarem a característica de redutores de deformações plásticas, quando o produto está sob efeito de tensões externas.

TAWFIK *et al.* (2006) desenvolveram um concreto polimérico onde foi misturado rejeito de mármore como enchimento em resina poliéster insaturada. A resina poliéster aplicada foi preparada da reação de oligômeros obtida da despolimerização do poli(tereftalato de etileno) (PET), descartados de garrafas de refrigerantes, com anidrido maleico e ácido adípico. A resina poliéster foi misturada com monômero de estireno na razão de 60:40% em peso para obtenção da reticulação do concreto polimérico. Os objetivos do estudo foram analisar a sustentabilidade da preparação do compósito polimérico para ser usado nas construções de materiais com base em polímeros e, relação com a preservação do meio ambiente e agregar valor aos rejeitos de PET e mármore. Os resultados mostraram que a resina poliéster obtida do PET proporcionou excelente cura aceitando a carga de enchimento com o mineral mármore, resultando na excelente resistência à tensão de compressão, aumento da resistência química e incremento na resistência ao calor e a chama. Desta maneira ficou evidente no estudo que os concretos poliméricos (compósitos) podem ser desenvolvidos industrialmente, por apresentarem além das vantagens citadas anteriormente, também a vantagem econômica por se tratar do aproveitamento de rejeitos no ganho de matéria prima e os benefícios ecológicos evitando a degradação do meio ambiente em função de descartes de resíduos inadequados.

MENDONÇA *et al.* (2002) estudaram que a precisão de uma máquina ferramenta depende em grande parte da sua base ou estrutura, sobre a qual todos os demais elementos, como guias, mancais e carro porta-ferramenta, estão apoiados. Materiais compósitos particulados, baseados em uma matriz de resina epóxi com incorporação de pó de granito ou pó de sílica, foram usados como base de máquinas ferramentas e máquinas de medição por coordenadas. Estes compósitos vêm substituindo gradualmente o ferro fundido, sendo que suas maiores vantagens são o menor coeficiente de expansão térmica, o menor peso e as excelentes características de amortecimento de vibrações. Estudos foram desenvolvidos embasados nos objetivos de investigar o efeito das variáveis do processamento de compósitos particulados constituídos por uma matriz polimérica de resina epóxi, onde as quantidades variaram entre 15 e 30% em peso e, por uma fase cerâmica composta por partículas de granito. Ensaio mecânicos foram realizados para verificar o efeito das variáveis de processamento. Propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram determinadas, junto com a densidade e o coeficiente de expansão térmica linear. Os resultados dos estudos mostraram que os efeitos da absorção de umidade e o elevado custo foram reduzidos minimizando a porcentagem de resina do compósito, sendo que as suas implicações no

processamento do material são discutidas. O melhor desempenho estrutural foi observado para os compósitos com 20% em peso de resina epóxi e 80% em peso de granito. As propriedades físicas estimadas, densidade e coeficiente de expansão térmica linear, apresentaram valores reduzidos e próximos aos da literatura, indicando adequação do material a aplicações em máquinas cujos componentes necessitam de precisão dimensional e peso reduzido.

Segundo LINTZ (2003) os compósitos poliméricos particulados, também conhecidos por concreto polimérico são formados pela polimerização de uma mistura de monômeros e agregados. Este material foi utilizado pela primeira vez no começo dos anos 50 como granito sintético nos Estados Unidos. Na década de 60 foi desenvolvido na Alemanha o concreto polimérico aplicado em reparos estruturais. Entretanto este material passou a ser largamente empregado a partir de 1970 nos Estados Unidos na fabricação de pré-moldados e em reparos de concreto de cimento portland. Atualmente os compósitos poliméricos particulados são utilizados na construção de elementos estruturais, estruturas subterrâneas e submersas, componentes estruturais em forma de sanduíche, painéis de parede suscetíveis a abalos sísmicos e vento, abóbada subterrânea que resiste a pressão lateral do solo, retenção de lixo radioativos, camadas de pavimentação e tabuleiros de pontes, amortecedores de vibrações, bases de máquinas, componentes de máquinas-ferramenta sujeitas a grande variação de carregamento, e dormentes de estradas de ferro submetidos a cargas dinâmicas e estáticas.

Segundo ACI 548.6R (1996), GNAUCK (1992) e ITTNER *et al.* (2000) os polímeros mais utilizados em compósitos poliméricos particulados são: metacrilatos, epóxi, furfurool, estireno, trimetilpropano de trimetacrilato, poliéster insaturado e éster de vinila. A produção de compósitos poliméricos particulados é feita pela mistura de um ou mais monômeros na forma líquida ao sistema de agregados. Aceleradores e catalisadores de polimerização são empregados na mistura para completar a polimerização dos monômeros. Os agregados mais utilizados são: areia silicosa, granito, mármore, cascalho de rio, basalto, cinzas volantes, carbonato de cálcio e pó de sílica.

LINTZ (2003) estudou que vários concretos poliméricos (compósitos) em função de seus aglomerantes, apresentam propriedades específicas. A Tabela 2.1 apresenta as propriedades mais comuns para diferentes concretos poliméricos (compósitos), estudados por LINTZ (2003).

**Tabela 2.1.** Propriedades de diferentes concretos poliméricos (compósitos)

Propriedades	Aglomerantes				
	Metacrilato	Epóxi	Furano	Poliéster - Estireno	Éster de vinila
Consumo em peso (%)	6 a 12	20	-	8 a 18	7
Resistência a flexão (MPa)	8 a 62	17 a 34	21 a 24	28 a 59	17 a 149
Resistência a compressão (MPa)	70 a 140	59 a 120	62 a 102	70 a 140	62 a 110
Resistência a tração (MPa)	8 a 14	9 a 24	9,6 a 14	11 a 70	10 a 90
Resistência ao cisalhamento (MPa)	26	-	-	2	-
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	2388	2180 a 2596	-	-	2404
Retração (%)	1,5 a 5,0	0,02 a 0,2	0,1 a 0,2	0,3 a 3	-

Fonte: LINTZ (2003).

AIGUEIRA *et al.* (2006) desenvolveram compósitos cuja matriz ligante foi a resina poliéster, com partículas abrasivas SiC (carbeto de silício) com tamanhos de grão por volta de 23 µm dispersas, nos teores de 5, 10, 20, 30, 40, 50% em peso. Estes compósitos foram utilizados em equipamentos (coroa) para serem empregados em polimento de rochas ornamentais e comparados com os compósito cimento magnesiano (SOREL)-SiC, que são os mais empregados neste tipo de operação. Os resultados dos testes dos compósitos submetidos ao desgaste, dentre os compósitos poliéster-SiC produzidos, as amostras que apresentaram melhores resultados foram as que possuem 50% em peso de SiC. Estas superaram em 5 vezes as amostras de SOREL-SiC no desempenho de abrasão, porém as mesmas apresentaram um resultado 4,6 vezes maior em termos de perda de massa, mostrando que o desempenho global entre os materiais foram similares.

DIEZ (2006) aplicou ¼ de resina poliéster pré-acelerada com ¾ de pó de granito e catalisador, no desenvolvimento de esculturas pelo método de vazamento. No processo foi utilizado um molde de silicone e as etapas de vibração, para assentamento das partículas de granito e vácuo para a eliminação das bolhas de ar no compósito. Para melhoria do aspecto superficial dos produtos (esculturas) foi aplicado um verniz com base em poliuretano. Os resultados foram excelentes onde o autor comenta que as características do produto dependem dos tamanhos das partículas e do tipo de polímeros para os produtos sintéticos terem as características e aspectos superficiais idênticos aos materiais tipo rochas naturais. Este método de desenvolvimento possibilitou a fabricação de pranchas sintéticas com grandes espessuras onde o escultor pode dar formas a este material pelos métodos de cortes, torneamento e fresa.

Segundo comenta a Patente do inventor SAKAI (2000), o desenvolvimento de pedras sintéticas tem como princípio o método convencional, que é baseado na

quebra e/ou moagem de pequenas partículas de rochas e posteriormente misturadas estas com carbonato de cálcio e resina, formando a união destes componentes em uma superfície dura. Especificamente SAKAI (2000) referencia a Patente Japonesa Nº S61-101,443, que descobriu o método de obter uma pedra artificial, a qual é feita pela mistura de pequenas partículas de pedra e resina, injetadas em um molde sob ação de vácuo. Após a cura a mistura moldada sofre cortes formando as lages.

Outro método, que SAKAI (2000) referencia é a Patente Japonesa Nº S53-24,447, que descreve a fabricação de pedras sintéticas misturando as partículas inorgânicas e o componente orgânico, sendo estes colocado em um molde, e agindo sobre a mistura uma pressão necessária até a formação da superfície dura.

SAKAI (2000) em sua Patente utiliza os métodos de compressão e injeção da mistura (compósito) para o desenvolvimento de pedras sintéticas. Os materiais naturais que fazem parte das pedras sintéticas são classificados em componentes: a) o primeiro componente é uma fina partícula inorgânica contendo tamanho entre 10 à 70 mesh que é o principal componente da pedra sintética. As partículas finas inorgânicas são de sílica, feldspato, mica e outros minerais naturais como granito e pedras metamórficas, a cerâmica, o vidro e metal; b) o segundo componente é a micro partícula contendo tamanho abaixo de 100 mesh. Estas micropartículas são o carbonato de cálcio, óxido de alumínio e outros; c) o terceiro componente é a resina polimérica como a acrílica e poliéster insaturada.

As finas partículas exercem o efeito principal de aparência e propriedades físicas das pedras artificiais. Particularmente estas partículas junto com os outros componentes conferem o padrão da cor do produto. As micropartículas têm a função de penetrar entre as finas partículas para garantir o preenchimento dos espaços vazios. A razão de peso das finas partículas em relação as micro partículas estão entre as faixas de 0,5:1,0 à 5,0:1. A alta razão de partículas finas de pedras naturais, formam produtos com aspectos diferentes das pedras naturais, onde apresentam baixas propriedades físicas. O uso de alta razão de micropartículas causa o inconveniente do baixo brilho da superfície do produto, porém alta dureza. Então a razão das finas partículas e micro partículas é limitada na faixa de 85% em peso sendo preferencial acima de 90% em peso. Com a razão de mais de 95% em peso o produto torna-se brilhoso e com alta dureza. Com a razão abaixo de 85% em peso, o produto é flexível o qual é impossível ter as propriedades de uma pedra. Isto significa dizer que a resina não deveria estar presente no compósito com mais de 15% em peso. A quantidade correta de resina deveria estar na faixa de 3 à 10% em peso (SAKAI, 2000).



O acabamento das pedras sintéticas é constituído por uma camada de um componente de finas partículas cobrindo a superfície da pedra, podendo ser à base de resinas (acrílica ou poliéster) ou uma substância inorgânica como vidro ou cerâmica por um processo de fritas. Estas camadas giram em torno de 5,0 a 50,0 µm (SAKAI, 2000).

## 2.3 RECICLAGEM

A reciclagem é o conjunto de técnicas cuja finalidade é aproveitar detritos e rejeitos e reintegra-los no ciclo de produção. Independente do tipo, a reciclagem de resíduos apresenta vantagens em relação à utilização de recursos naturais (materiais virgens), nos quais se tem ganhado na redução do consumo de energia, diminuição do volume de extração de matérias-primas, menores emissões de poluentes e ganho na saúde e segurança da população. A preservação dos recursos naturais é a maior vantagem da reciclagem, prolongando a vida útil e minimizando a destruição da flora e fauna (MENEZES *et al.*, 2002).

Segundo MACHADO *et al.* (2002) no contexto da reciclagem, é importante a correta definição de termos como: resíduo, rejeito e subproduto. O termo resíduo é utilizado para designar o que resta de um processo produtivo e quando não existe aplicação para o mesmo, tem-se o que se chama rejeito. Mas, desde que se conheça uma aplicação para os resíduos, os mesmos passam a ser classificados como subprodutos. Do ponto de vista ecológico, a reciclagem é uma forma de minimizar os inconvenientes que a deposição ou estocagem de resíduos causa à comunidade e as empresas geradoras.

### 2.3.1 Necessidade de uma Metodologia para a Reciclagem

De forma geral, os estudos sobre reciclagem de resíduos se limitam a aspectos do desenvolvimento técnico do material e, felizmente com maior frequência, a analisar os impactos ambientais do processo. Porém, a ênfase da viabilidade do mercado é com o compromisso da eficácia da reciclagem, pois os benefícios sociais de um processo somente vão se realizar na sua totalidade se o novo produto produzido gerar empregos, reduzir o volume de aterros, consumir resíduos em vez de recursos naturais e evitar a contaminação do ambiente ou o comprometimento da saúde da população. A viabilidade em um determinado mercado depende da

viabilidade econômica do processo, da estratégia de marketing adotada, da adequação do produto às restrições legais locais e de sua aceitação pela sociedade. Assim, o desenvolvimento de investigação no domínio de ciências dos materiais e ambientais é fundamental, mas não suficiente. Conseqüentemente, um processo metodológico de desenvolvimento de técnicas para reciclagem de resíduo com resultados viáveis em determinado mercado é uma tarefa complexa, a qual envolve conhecimentos de ciências de materiais, ambientais, de saúde, econômicas, marketing, legais e sociais, além da avaliação de desempenho do produto em um cenário de trabalho multidisciplinar (JOHN *et al.* 2003).

### 2.3.2 A Reciclagem como Desenvolvimento Sustentável

Segundo GRIJÓ *et al.* (2003) a busca ao desenvolvimento sustentável tem como propósito emergente incentivar a mudança do comportamento da sociedade em relação ao lixo: não desperdiçar, separar, reduzir a geração e participar do processo coletivo contemporâneo de sanear resíduos, reutilizando, reciclando, criando, recuperando, reaproveitando e multiplicando entre as pessoas, a idéia de que os rejeitos ao serem beneficiados após o consumo poderão se transformar em matéria-prima e resgatar seu valor econômico agregado novamente em uma cadeia produtiva e econômica. No Brasil, do total do lixo coletado, apenas 14% tem destinação adequada. O restante é depositado a céu aberto ou em cursos d'água (mais de 180.000 t/dia). Apenas 28% dos dejetos industriais no país são tratados. Uma pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABETRE) revelou que dos 2,9 milhões de toneladas de resíduos industriais gerados no Brasil, apenas 28% têm destino conhecido, ou seja, são tratados, destinados e dispostos adequadamente, sem causar danos ao meio ambiente. Os outros 72%, tem solução inadequada, o que acaba provocando sérias contaminações no solo e nas águas subterrâneas. Comprovadamente o lixo mal deposto provoca degradação irreversível dos recursos hídricos, transgressão paisagística polui o ar e o solo, assoreia rios e gera inundações. A gestão dos resíduos sólidos deveria ser pauta principal na política de segurança das nações, levando-se em consideração que mais de 5 bilhões de reais de materiais recicláveis são desperdiçados e enterrados por ano, somente em nosso país e que 80% dos leitos hospitalares no país derivam da falta de saneamento básico e uma deposição ineficiente dos descartes urbanos, rurais e industriais.

A sinalização de tendências das linhas do desenvolvimento tecnológico e produtivo para os dias atuais é a tomada de consciência de que o padrão de produção e consumo dos recursos naturais não renováveis, engendrado pelo modelo de industrialização do século passado, não é mais sustentável. Quais produtos provocaram ou acentuaram o nível de degradação dos dias de hoje pouco importa, o que conta é que atualmente já se tem noção de que os materiais produzidos a partir de recursos minerais não renováveis são à base desse modelo. O aumento da população, aliado ao modelo já insustentável de crescimento econômico intensivo em energia e em materiais, exerceu forte pressão sobre os bens minerais e conseqüentemente, sobre o equilíbrio ambiental do Planeta (MEDINA, 2006).

Partindo dos princípios de MEDINA (2006) a proposta do estudo deste trabalho, que trata do desenvolvimento de pedras sintéticas, entre outras também contempla a expectativa tecnológica no âmbito da reciclagem, que pode orientar a um modelo sustentável para o desenvolvimento de novos materiais compósitos para o setor de mineração da área de rochas ornamentais.

Durante a última década, a integração prática do conceito de desenvolvimento sustentável tornou-se um dos maiores desafios para a nossa sociedade. O atual modelo de crescimento econômico está intimamente vinculado aos aspectos das ações ambientais industriais e fortemente condicionado ao esgotamento dos recursos naturais. Portanto, torna-se imperativa a adoção de estratégias de desenvolvimento industrial que contemplem alternativas tecnológicas tanto para reduzir os impactos dos resíduos ao meio ambiente, quanto para preservar os recursos naturais, sem comprometer o crescimento da atividade econômica. Atualmente, a reciclagem de materiais constitui um dos mais importantes temas para estudo, uma vez que envolve aspectos técnicos, econômicos e ambientais. (MACHADO *et al.*, 2002)

Segundo MEDINA (2006) o movimento de tomada de consciência ambiental, surgido no final do século XX, mostrou um novo paradigma de produção e consumo sustentável de materiais que deve se tornar um imperativo para o século XXI. Nesse novo paradigma a reciclagem se apresenta como uma solução importante para prolongar a vida dos recursos não renováveis. Critérios de reciclabilidade passam a fazer parte da escolha de materiais para produtos e processos no desenvolvimento de novos projetos industriais. Na linha da gestão da qualidade, a gestão ambiental passa a ser normatizada e se torna fator de competitividade. Assim, a reciclagem passa a fazer parte da gestão ambiental da produção, como destino final mais correto a ser dado aos resíduos industriais, assim como aos componentes e produtos após vida útil.

A reciclagem de produtos após vida útil, pós-consumo, é, uma atividade complexa, em termos técnicos e econômicos sociais além de nem sempre ser uma solução sem riscos ambientais, apesar de ser altamente difundida dentre as propostas de desenvolvimento sustentável. A reciclagem e o desenvolvimento sustentável têm em comum o fato de ambos exigirem não apenas mudanças tecnológicas, mas, sobretudo, mudanças de atitudes, tanto políticas como culturais. A associação desses dois elos pressupõe mudanças radicais que vão constituir os patamares da construção de um novo paradigma sócio-técnico e econômico onde um mercado de produtos duráveis e recicláveis ocupará o lugar do atual mercado de consumo em massa de produtos descartáveis MEDINA (2006).

MEDINA (2005) comenta que a maior vantagem da reciclagem é permitir fechar o ciclo de vida dos materiais fazendo-os retornar a novos produtos, como matéria-prima secundária, com grande economia de energia e de recursos naturais primários. O desafio maior é acompanhar a evolução dos materiais para melhor gerenciar seus ciclos de vida. Por outro lado, é necessário haver um desenvolvimento articulado das técnicas e processos de tratamento de resíduos, separação e reciclagem de produtos em fim de vida. Uma gestão sustentável dos materiais envolveria, assim, uma intervenção no ciclo de vida dos materiais, tal como ele se apresenta hoje, para buscar em cada etapa eliminar perdas, rejeitos, emissões etc, no sentido de uma produção sem retornos ao meio ambiente. O ideal seria produzir em um sistema fechado com reciclagem ao longo de todo o ciclo. O fluxo fechado de materiais funcionaria na qual a extração de matérias primas primárias só ocorreria em função de um aumento do nível geral de produção, pelo crescimento do mercado mundial.

Partindo do ponto de vista de uma reciclagem racional, FORLIN *et al.* (2002) destaca que seria uma abordagem integrada entre os processos de transformação das matérias-primas, fabricação e ou beneficiamento do produto final, e sua funcionalidade na conservação de produto.

Relacionados aos comentários anteriores, analisando a cadeia de desenvolvimento de compósitos com resinas termofixas (poliéster, acrílica) com carga mineral (granito, mármore), que envolve a proposta deste trabalho, a rotatividade do produto obtido por reciclagem permite a integração da reciclagem dos resíduos (subprodutos) oriundos da primeira reciclagem. Isto se deve ao fato que as resinas termofixas têm a propriedade de aglomerar as cargas minerais e conseqüentemente é viável unir minerais já envolvidos por resinas, devido a afinidade química com a nova matriz polimérica, quando o produto sintético terminar sua vida útil.

### 2.3.3 Reaproveitamento de Rochas Naturais

O Brasil importa o mármore ou granito sintético a preços com elevado valor agregado e somada a abundância de matérias-primas resultantes da lavra das rochas naturais, começou em baixa escala produtiva, também o desenvolvimento da reciclagem deste subproduto em produtos sintéticos. Do ponto de vista econômico, a tecnologia da reciclagem de rochas naturais não é tarefa das mais difíceis principalmente pelo fato do material ser abundante desperdiçado (considerado lixo) e possuir as mais variadas aplicações (MACHADO *et al.*, 2002)

Analisando este contexto do lixo de pedras naturais, percebe-se que a indústria do setor mineral demonstra preocupações voltadas com as legislações do meio ambiente, bem como para o desenvolvimento de novos materiais vinculados a reciclagem.

As reciclagens de rejeitos de rochas ornamentais estão muito focadas na incorporação de produtos cerâmicos (MOREIRA *et al.*, 2003 e MOTHÉ *et al.*, 2005). O desenvolvimento de pedras sintéticas, compósitos com matriz polimérica, não é tão incidente, levando-se em conta que estes resíduos na forma de pó ou grânulos podem ser aplicados na confecção de pedras sintéticas.

Vários fabricantes de pedras sintéticas (compósitos) citam vantagens deste produto. Entre as características técnicas comparativas podemos referenciar segundo BRETON (2000) que em média as rochas sintéticas apresentam, por exemplo: resistência à flexão de 632,22kgf/cm<sup>2</sup>, resistência à compressão de 2198,49kgf/cm<sup>2</sup> e porcentagem de absorção de água de 0,02%. Em contrapartida CAESARSTONE (2007) mostra que o granito natural (rosa fiorito) apresenta resistência à flexão de 134 kgf/cm<sup>2</sup>, resistência à compressão de 1921 kgf/cm<sup>2</sup> e porcentagem de absorção de água de 0,33%.

A utilização dos rejeitos de materiais de pedras para o desenvolvimento de rochas sintéticas, mostra vantagens comparada as pedras naturais nas características técnicas mencionadas acima, bem como diminuir a quantidade de rejeito a ser descartada na natureza, além de agregar valor a um resíduo indesejável, e possibilita também a geração de novos empregos.

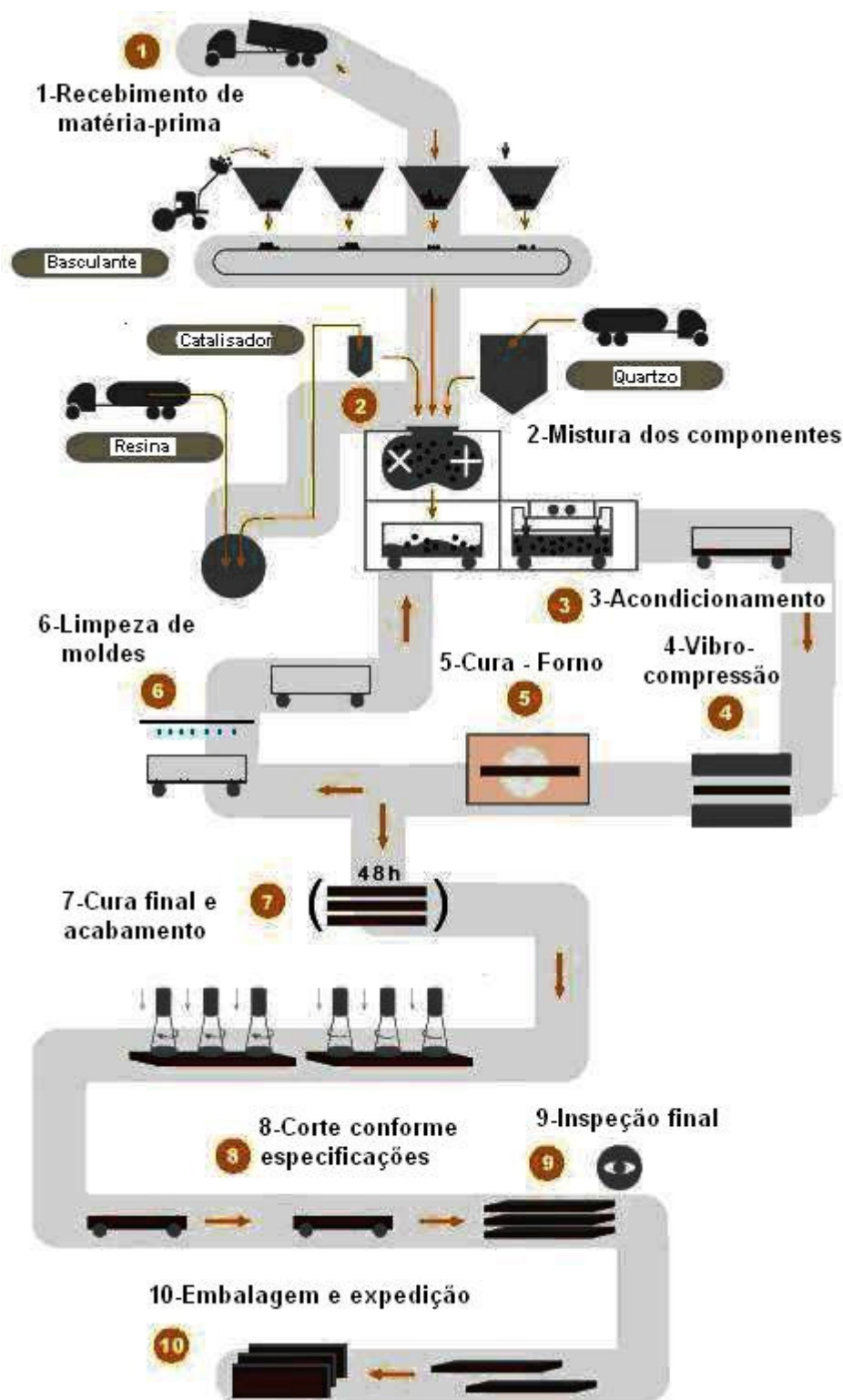
## 2.4 A PRODUÇÃO DE PEDRAS SINTÉTICAS

A indústria mineral do mármore e granito se dedica a exploração e beneficiamento de rochas ornamentais desde a extração dos blocos em brutos das

minas, até o desdobramento dos mesmos em chapas semi-acabadas como; ladrilhos para revestimento, colunas, esculturas, etc.

O granito sintético, segundo as empresas que mais se sobressaem no desenvolvimento da pedra sintética e construção de equipamentos para a manufatura deste produto, citados pela BRETON COMPANY (2006), COMPAC MARMOL E QUARTZ (2006) e CAESARSTONE (2007), é um material maciço, impermeável, não mancha, uma vez que impede a penetração de líquidos, mantendo-os apenas sobre a sua superfície já que a resina serve não só para fazer a aderência entre as partículas da rocha, mas penetra entre os seus interstícios (vazios ou poros) eliminando a porosidade natural da pedra.

Entre as tecnologias patenteadas para o desenvolvimento de pedras sintéticas destaca-se no mercado o processo que usa o método de vibra compressão com vácuo, processo esse utilizado pela COMPAC MARMOL E QUARTZ (2006), que enfoca o uso das tecnologias vibra compressão com vácuo com uma visão mais detalhada do seu processo produtivo, mostrado na Figura 2.1. O processo é dividido em fases, sendo que na fase 1, ocorre o recebimento da matéria-prima como: granito (quartzo, feldspato). Nesta fase faz-se a moagem dos materiais e selecionam-se as partículas nos tamanhos desejados.



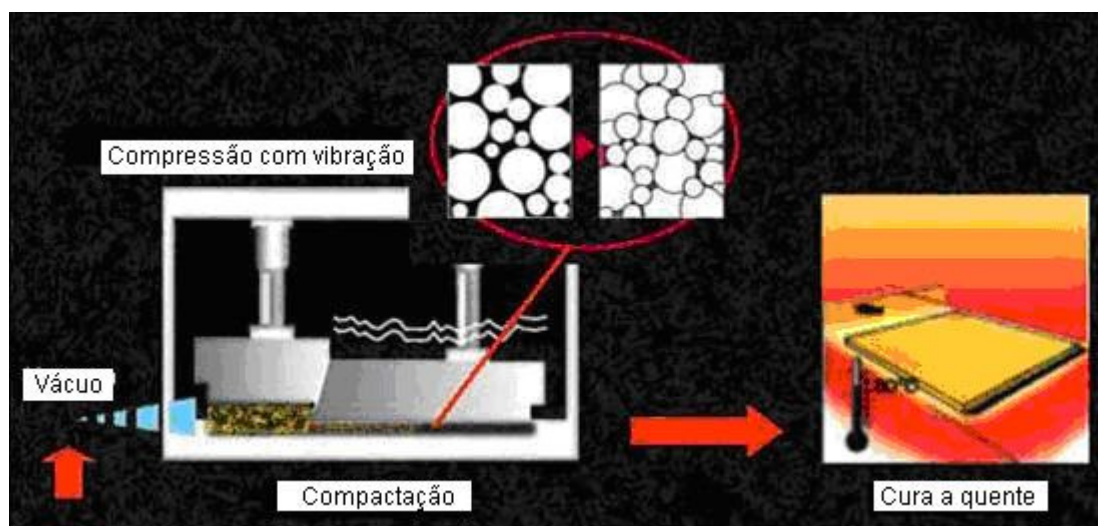
**Figura 2.1.** Etapas de fabricação da pedra tecnológica (compósito de pedra), desenvolvida pela Compac Marmol e Quartz company. Adaptado de COMPAC MARMOL E QUARTZ (2006).

Na sequência, na fase 2 ocorre a mistura dos componentes, com as proporções corretas de resina polimérica, catalisadores e aditivos, para formar o

compósito de pedra. Também é realizada nesta etapa a dosagem, em moldes, da quantidade do compósito para a formação dos blocos de pedra sintéticos.

Continuando o processo, na fase 3 é realizado o acondicionamento do material nos moldes conforme dimensões dos blocos e transportado para a fase 4, onde ocorre a vibro compressão a vácuo para a determinação do bloco de composto de pedra. Em seguida na fase 5 o bloco de composto de pedra (laje) é acondicionado por aproximadamente 45 minutos em forno para realização da cura da resina polimérica, garantindo as propriedades exigidas do produto final. Em paralelo na etapa 6 ocorre a limpeza e preparação dos moldes para retornar a linha de produção. Na etapa 7 acontece a cura final dos blocos de pedra em composto polimérico por um tempo de 48 horas, e também o acabamento para definir a uniformidade de espessura do produto. Já na fase 8 ocorre o corte com disco de diamante, dos blocos conforme especificações dos produtos. Na fase 9 faz-se a inspeção final e encaminha-se para a fase 10 para embalagens e expedição.

De modo geral a fase 4 é uma das etapas importantes do processo, mas depende fundamentalmente da fase 1 em que se dá a moagem dos minerais, ou seja, a necessidade de granulometrias diferenciadas dentro da faixa de 0,1mm a 6mm, onde garantem o preenchimento por completo dos interstícios, ou seja, os vazios provocados entre duas ou mais pedras de grandes dimensões juntas no momento da vibro compressão, como pode ser observado na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Etapa de compactação por vibra compressão a vácuo, mostrando as pequenas partículas acomodando-se entre as grandes partículas. Adaptado de CAESARSTONE (2007).



## 2.5 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE PEDRA COM POLÍMERO

Segundo estudos da CAESARSTONE (2007), baseados nos testes de ensaios especificados para pedras sintéticas desenvolvidas por BRETON COMPANY (2006), a empresa procura atender as especificações conforme Tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Especificações técnicas de pedras sintéticas.

Testes Executados	Normas	Resultados
Tensão de flexão	DIN 52112	515 Kgf/cm <sup>2</sup>
Absorção de água	DIN 52103	0,02%
Manchas/Resistência a ácidos	ASTM D-2299	Não afetado
Característica da superfície em chama	ASTM E-84	Chama índice 10
		Densidade da fumaça 195
Tensão de Compressão	DIN 52105	2200 Kgf/cm <sup>2</sup>
Congelamento/Descongelo	DIN 52104	2082 Kgf/cm <sup>2</sup> (Após 25 ciclos)
Tensão de Impacto	D.M. 2234	135 cm
Densidade	Não especificou norma	2,4459 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: CAESARSTONE (2007).

A Tabela 2.3, mostra as principais características das pedras sintéticas desenvolvidas pelo fabricante CAESARSTONE (2007).

**Tabela 2.3.** Comparações entre as pedras sintéticas sobre as pedras naturais.

Adaptado de CAESARSTONE (2007).

Dados analisados e normas aplicadas	Tensão de Flexão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Teste de impacto (cm)	Absorção de água (%)	Tensão de compressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão de compressão ao congelamento (Kgf/cm <sup>2</sup> ) Após 25 ciclos
CaesarStone	515	135	0,02	2200	2082
Mármore (Botticino)	60	29	0,55	2161	2082
Granito (Rosa Fiorito)	134	61	0,33	1921	1906
DIN Standard	52112	2234	52103	52105	52104
Comparações médias entre as pedras sintéticas da CaesarStone versus mármore e granito natural					
CaesarStone vs. Mármore	8,5 vezes maior	4,6 vezes maior	27,5 vezes menos	Em média são iguais	Em média são iguais
CaesarStone vs. Granito	3,8 vezes maior	2,2 vezes maior	16,5 vezes menos	1,1 vezes maior	1,1 vezes maior

## 2.6 DURABILIDADE DOS POLÍMEROS

### 2.6.1 Degradação Por Radiação Ultravioleta

Nosso estudo do desenvolvimento de compósitos (pedras sintéticas) faz a utilização de resina acrílica onde os componentes são orgânicos. Dependendo das condições de exposição deste produto a luz solar, acredita-se que algumas características como cor, textura e condições físicas podem ser alteradas. Pretende-se verificar as influências sofridas pelos compósitos (pedras sintéticas) comparadas com pedras naturais expostas ou não a radiação ultravioleta.

DE PAOLI (1982) comenta que a maioria dos materiais plásticos são sensíveis ao intemperismo, processo onde a ação da luz solar e o oxigênio são incidentes. Uma das radiações a luz solar é a ultravioleta. Estas radiações provocam excitações moleculares em compostos orgânicos, onde as reações químicas podem ser aceleradas pelo efeito da temperatura causada pelo aquecimento solar. As avaliações dos efeitos podem ser realizadas por várias técnicas, como os ensaios de exposição natural e acelerado, entretanto a complexidade do processo de degradação dos polímeros limita conclusões generalizadas.

WHITE *et al.* (1994) destacam que não existe uma definição formal para o termo “correlação” em envelhecimento, ou seja, correlação entre exposição natural e acelerada. É assumido que não existe na realidade correlação entre resultados de exposição ao intemperismo natural e acelerado na forma de relação quantitativa, mas sim observação de tendências semelhantes. É evidente que uma série de mecanismos que ocorrem no processo de envelhecimento natural dos materiais não é reproduzida nas condições aceleradas. Deste modo, ensaios de exposição ao intemperismo acelerado devem somente ser considerados como indicativo grosseiro do comportamento do material em condições de uso naturais, permitindo a seleção de formulações mais adequadas, porém impossibilitando a predição da vida útil do mesmo.

## 2.7 ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

Conforme TORRES *et al.* (2005), a luz solar consiste de radiações classificadas pelo espectro eletromagnético, que compreendem os raios cósmicos, raios gamas, os raios X, o ultravioleta (UV), a luz visível, o infravermelho (IV), as microondas, as ondas de rádio e as ondas elétricas.

Segundo MOTTA *et al.* (2002) a radiação solar que atinge as camadas mais exteriores da atmosfera terrestre possui espectro contínuo entre 0,7 e 3.000 nm. Entretanto, ao passar pelas diversas camadas da atmosfera, somente uma parte deste espectro atinge a superfície terrestre, notadamente acima de 290 – 300 nm. A Tabela 2.4 mostra a distribuição espectral média da radiação solar que atinge a superfície terrestre. Observa-se a partir destes dados que somente 6% da radiação incidente na superfície terrestre encontram-se dentro da faixa do ultravioleta, sendo esta pequena porção do espectro solar a responsável pelos processos degradativos sofridos pelos polímeros comerciais.

**Tabela 2.4.** Intensidade de radiação global.

Tipo de radiação		Comprimento de onda ( $\lambda$ ), nm	Intensidade, W/m <sup>2</sup>	Proporção, %
ULTRA-VIOLETA		Menor que 280	0	0
		280 a 320	5	0,5
		320 a 360	27	2,4
		360 a 400	36 $\Sigma = 68$	3,2 $\Sigma = 6,1\%$
VISÍVEL		400 a 440	56	5,0
		440 a 480	73	6,5
		480 a 520	71	6,3
		520 a 560	65	5,8
		560 a 600	60	5,4
		600 a 640	61	5,5
		640 a 680	55	4,9
		680 a 720	52	4,6
		720 a 760	46	4,1
		760 a 800	41 $\Sigma = 580$	3,7 $\Sigma = 51,8\%$
INFRAVERMELHO	PRÓXIMO	800 a 1.000	156	13,9
		1.000 a 1.200	108	9,7
		1.200 a 1.400	65 $\Sigma = 329$	5,8 $\Sigma = 29,4\%$
	DISTANTE	1.400 a 1.600	44	3,9
		1.600 a 1.800	29	2,6
		1.800 a 2.000	20	1,8
		2.000 a 2.500	35	3,1
		2.500 a 3.000	15 $\Sigma = 143$	1,3 $\Sigma = 12,7\%$

Fonte: MOTTA *et al.* (2002)

Segundo CORRÊA (2003) quando a R-UV atinge a superfície da terra, a mesma exerce vários efeitos sobre os seres vivos e materiais orgânicos, em função do excesso e longo prazo de exposição, como: influências sobre o crescimento de lavouras e frutos, produção de fitoplânctons, os cânceres e mutações genéticas em peixes e anfíbios, o desgaste e deterioração de tintas e polímeros. Nos seres humanos causam queimaduras, envelhecimento precoce, dificuldades de respostas do sistema imunológico, cataratas e diversos tipos de câncer de peles. Por outro lado à exposição à R-UV é necessária para proporcionar efeitos benéficos como a síntese da vitamina D<sub>3</sub>, fundamental para as funções osteoblástica e paratireóide.

### 3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Ao longo desse capítulo faz-se uma abordagem sobre a metodologia empregada para a obtenção dos resultados apresentados nesta dissertação de mestrado. Primeiramente apresenta-se as especificações das resinas termofixas, das pedras (naturais e sintéticas) e dos aditivos que foram utilizados. Na sequência, fluxogramas das etapas experimentais são mostrados para facilitar o entendimento de cada fase do trabalho e, finalmente, faz-se uma breve descrição dos processos, equipamentos e ensaios que foram utilizados durante a execução dos experimentos.

#### 3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

A Tabela 3.1 apresenta as especificações dos materiais empregados, cedidas pelos fornecedores.

**Tabela 3.1.** Especificações dos materiais.

<b>Matéria-Prima</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Especificações</b>
Resina termofixa poliéster orto-tereftálica Arazyn®	CRE Indústria e Comércio*	ver Apêndice A
Resina termofixa acrílica Polaris®	Araqúmica – AraAshaland**	ver Apêndice B
Pedra natural tipo granito Caju	Marmoraria Dalsasso Ltda*	---
Pedra natural tipo mármore Branco	Marmoraria Dalsasso Ltda*	---
Pedra sintética Stellar Marina® Especificaremos por Pedra 1	Marmoraria Schmidt*	Marca Sile Stone®, cód. 2007, fabricante: Cosentino Latino América S. L. ***
Pedra sintética Azul Cielo® Especificaremos Pedra 2	Marmoraria Schmidt*	Marca Sile Stone®, cód. 5001, fabricante: Cosentino Latino América S. L. ***
Estabilizante Ultravioleta Tinuvin® 123	Ind. Química Basf	ver Apêndice C
Absorvedor Ultravioleta Tinuvin® 405	Ind. Química Basf	ver Apêndice D

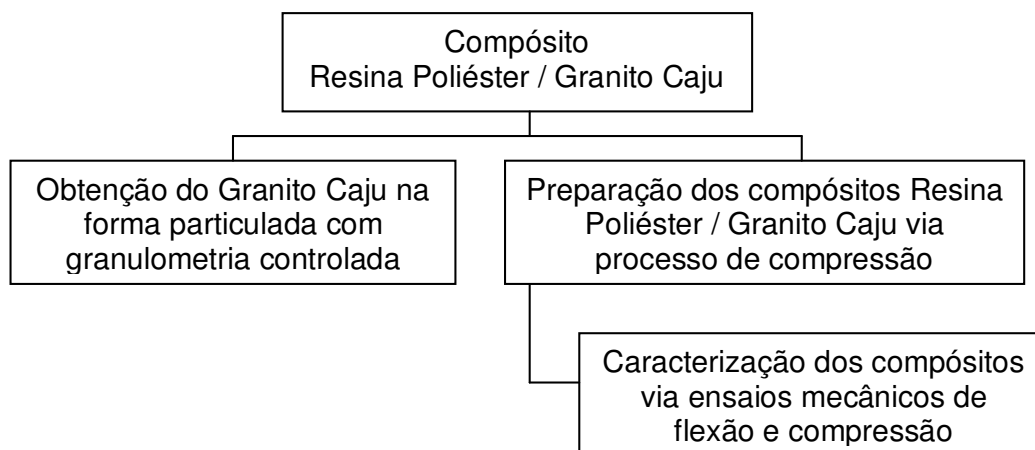
\* localizado na cidade de Joinville, SC.

\*\* localizado na cidade de Araçariquama, estado de São Paulo.

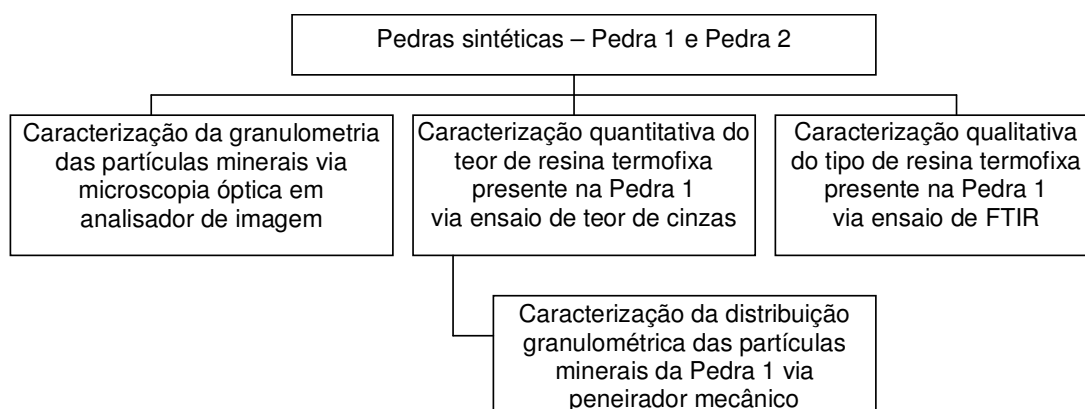
\*\*\* localizado na cidade de São Paulo, SP.

### 3.2 ETAPAS EXPERIMENTAIS

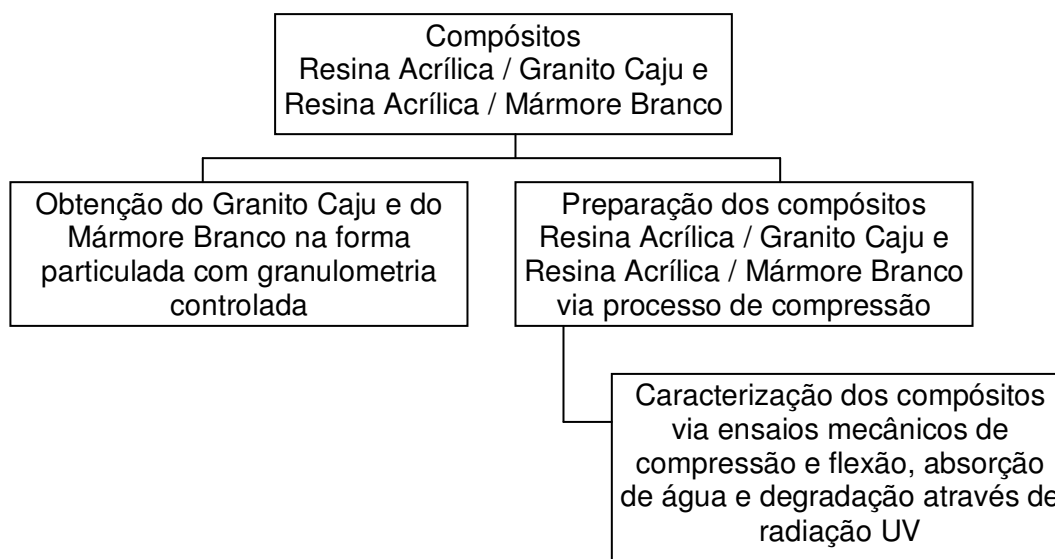
As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam fluxogramas das atividades experimentais que foram realizadas com as resinas termofixas, as pedras naturais e as pedras sintéticas. Na primeira etapa do trabalho (Figura 3.1) o objetivo foi estudar as condições do processo de compressão para a produção do compósito resina poliéster com a pedra natural Granito Caju, bem como as propriedades mecânicas de resistência à flexão e compressão dos compósitos produzidos. A segunda etapa (Figura 3.2) teve como objetivo a caracterização das pedras sintéticas – Pedra 1 e Pedra 2 quanto ao tamanho de partícula, quantidade e tipo de resina termofixa presente, ou seja, buscou-se um melhor conhecimento das características básicas das pedras sintéticas comercializadas no mercado. Na terceira etapa (Figura 3.3) o objetivo foi avaliar as propriedades mecânicas de compressão e flexão (antes e depois da degradação através de exposição à radiação UV) e a taxa de absorção de umidade do compósito de resina acrílica com as pedras naturais Granito Caju e Mármore Branco. A quarta e última etapa do trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade econômica dos compósitos de resina termofixa com pedras naturais produzidos.



**Figura 3.1.** Etapas experimentais dos compósitos de Resina Poliéster com Granito Caju.



**Figura 3.2.** Etapas experimentais de caracterização das pedras sintéticas – Pedra 1 e Pedra 2.



**Figura 3.3.** Etapas experimentais relativas aos compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju e com Mármore Branco.

### 3.3 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA POLIÉSTER COM GRANITO CAJU

#### 3.3.1 Obtenção das Partículas de Granito Caju

O granito Caju foi escolhido como a pedra natural a ser utilizada na confecção dos compósitos com resina poliéster devido ao grande volume de resíduos dessa pedra presentes nas marmorarias de Joinville - SC. Constatou-se isso durante a coleta dos retalhos de granito natural efetuada nas marmorarias.

As granulometrias empregadas para as pedras sintéticas com granitos varia de 0,1 a 6,0 mm (COMPAC MARMOL E QUARTZ, 2006). Baseado nesta informação realizou-se a moagem dos rejeitos das pedras de granito Caju com o auxílio de martelos e marretas, passando-as em uma peneira granulométrica de 4,75 mm e posteriormente em uma peneira de 3,36 mm.

#### 3.3.2 Obtenção dos Compósitos com resina poliéster via Processo de Compressão

Compósitos de resina poliéster com a pedra natural Granito Caju foram preparados na forma de placas através do processo de compressão utilizando uma prensa CIOLA LACIO (capacidade de pressão máxima igual a 100 toneladas). As quantidades de resina presente nos compósitos foram de 8%, 10% e 15% (em massa). A quantidade de 8% de resina foi baseada na Patente de SAKAI (2000). As quantidades de 10% e 15% foram valores empíricos adotados para se verificar as características dos compósitos de acordo com as variações da quantidade de resina.

Foi utilizado 600 g de granito Caju (partículas que passaram pela peneira de 4,75mm) para a produção de cada amostra de compósito com resina poliéster (quantidade necessária para garantir o completo preenchimento da cavidade do molde). Variações nas pressões de compressão (de 10 até 80 toneladas) também foram realizadas, pois durante essa primeira etapa, o objetivo principal era compreender o processo com relação à manipulação dos parâmetros (pressões de compactação, mecanismos do molde, agilidade na extração dos moldados e manuseio dos ingredientes das formulações dos compósitos).

A preparação dos compósitos ocorreu da seguinte forma: (1) em um copo de Becker, adicionava-se o catalisador MEK (Metil-etil-cetona) sobre a resina poliéster (1,5 mL de MEK para cada 100g de resina, segundo recomendação do fornecedor da resina); (2) misturava-se manualmente a resina com o catalisador até a mistura ficar



homogênea; (3) adicionava-se a mistura resina com catalisador ao granito Caju e efetuava-se a mistura desses três componentes até se notar a total umectação das partículas de granito; (4) colocava-se a mistura num molde cilíndrico já posicionado na prensa CIOLA e fazia-se a compressão por 60 minutos; (5) os compósitos (na forma de placas cilíndricas) eram extraídos do molde e ficavam condicionados em estufa de ar circulante marca FANEM – MOD 320 - SE por 24 horas a 90°C para garantir a completa cura da resina poliéster.

Corpos de prova para os ensaios mecânicos de resistência à compressão e flexão foram obtidos através de corte e polimento das placas dos compósitos de resina poliéster com granito Caju. As dimensões dos corpos de prova seguiram as especificações recomendadas pelas normas ISO 178 (flexão) e ABNT NBR 12767 (compressão)

### 3.4 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU

#### 3.4.1 Obtenção das Partículas de Granito Caju

Após a análise da distribuição granulométrica das partículas minerais existentes na pedra sintética – Pedra 1, procurou-se obter as partículas de granito Caju com similar distribuição granulométrica.

O procedimento para obtenção das partículas de granito Caju para a produção de compósitos com resina acrílica ocorreu, inicialmente, através do uso de martelos e marretas, quebrando as placas de rejeitos de granito fornecidas pela marmoraria. As partículas obtidas dessa quebra inicial foram separadas por peneiras com diferentes faixas granulométricas (Tabela 3.2). Entretanto, essa quebra manual era um processo muito lento e desgastante. Dessa forma, optou-se por agilizar o processo de moagem das partículas menores que 0,59 mm através de um moinho de bolas marca CERTECH – MOD. CT.

#### 3.4.2 Obtenção dos Compósitos com Resina Acrílica via Processo de Compressão

Compósitos de resina acrílica com a pedra natural granito Caju foram preparados na forma de placas através do processo de compressão usando a prensa CIOLA LACIO (capacidade de pressão máxima igual a 100 toneladas).

**Tabela 3.2.** Distribuição granulométrica das partículas de granito Caju para serem utilizadas nos compósitos com resina acrílica.

Granulometria	Quantidade (% em massa)
Partículas maiores que 0,074 mm e menores que 0,59 mm	55
Partículas maiores de 0,59 mm e menores que 0,84 mm	15
Partículas maiores que 0,84 mm e menores que 1,68 mm	30
Total	100

Para cada placa de compósito a ser produzida, utilizou-se uma massa de 600g da pedra granito Caju (de acordo com a capacidade do molde) e força de fechamento da prensa de 40 toneladas (pois essa força forneceu melhores resultados nos estudos do compósito resina poliéster com granito Caju, onde as pressões de compressão foram variadas), gerando uma pressão de compactação de 246 kgf/cm<sup>2</sup> sobre as partículas. As quantidades mássicas de resina acrílica foram 8%, 10% e 12%. A quantidade mássica de 8% foi utilizada de acordo com experimento da confecção de compósitos de resina poliéster com Granito Caju. As quantidades mássicas de 10% e 12% foram valores empíricos adotados para se verificar as características do compósito de acordo com as variações da quantidade de resina.

Quantidades de estabilizantes e absorvedores de luz ultravioleta (TINUVIN® 123 e 405, respectivamente) também foram adicionadas às formulações. A Tabela 3.3 apresenta a descrição dessas formulações utilizadas para a confecção de nove compósitos de resina acrílica com granito Caju.

O procedimento para a confecção desses nove compósitos seguiu as etapas: (1) secagem das partículas de granito Caju em estufa marca FANEM – MOD 320 - SE; (2) pesagem dos componentes do compósito; (3) incorporação da resina, aditivos e catalisador MEK (metil-etil-cetona) ao mineral granito (1,5 mL de MEK para cada 100g de resina, segundo recomendação do fornecedor da resina); (4) mistura manual de todos os componentes; (5) carregamento do molde com a mistura; (6) compressão do compósito utilizando 40 toneladas de força de fechamento por 60 minutos (etapa de cura), com exceção do Compósito-2 que sofreu compressão de 30 minutos, pois houve interrupção do processo por erro de alteração de comando da prensa, provocando a abertura da mesma antes do tempo de 60 minutos.

Após a extração dos compósitos do molde, os mesmos foram condicionados em estufa de circulação de ar marca FANEM – MOD 320 - SE por um período de 24 horas a uma temperatura de 90°C, cujo objetivo foi de complementar a cura da resina acrílica.

**Tabela 3.3.** Formulações dos compósitos de resina acrílica com granito Caju.

Compósito-1	Massa (g)	Compósito-2	Massa (g)	Compósito-3	Massa (g)
88% de granito	600,0	88% de granito	600,0	88% de granito	600,0
12% de resina	81,8	12% de resina	81,8	12% de resina	81,8
Tinuvin® 123 (0,0%)	0,0	Tinuvin® 123 (0,5%)	0,4	Tinuvin® 123 (2,0%)	1,6
Tinuvin® 405 (0,0%)	0,0	Tinuvin® 405 (1,0%)	0,8	Tinuvin® 405 (3,0%)	2,5
Massa do compósito	681,8	Massa do compósito	683,0	Massa do compósito	685,9
Mcac	655,6	Mcac	655,6	Mcac	655,6
Mppc	26,2	Mppc	27,4	Mppc	30,3
Mfrc	55,60	Mfrc	54,37	Mfrc	51,51
<b>%Mfrc</b>	<b>8,48%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>8,29%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>7,86%</b>

Compósito-4	Massa (g)	Compósito-5	Massa (g)	Compósito-6	Massa (g)
90% de granito	600,0	90% de granito	600,0	90% de granito	600,0
10% de resina	66,7	10% de resina	66,7	10% de resina	66,7
Tinuvin 123 (0,0%)	0,0	Tinuvin 123 (0,5%)	0,3	Tinuvin 123 (2,0%)	1,3
Tinuvin 405 (0,0%)	0,0	Tinuvin 405 (1,0%)	0,7	Tinuvin 405 (3,0%)	2,0
Massa do compósito	666,7	Massa do compósito	667,7	Massa do compósito	670,0
Mcac	652,87	Mcac	652,58	Mcac	642,43
Mppc	13,8	Mppc	15,1	Mppc	27,6
Mfrc	52,87	Mfrc	51,58	Mfrc	39,10
<b>%Mfrc</b>	<b>8,10%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>7,90%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>6,09%</b>

Compósito-7	Massa (g)	Compósito-8	Massa (g)	Compósito-9	Massa (g)
92% de granito	600,0	92% de granito	600,0	92% de granito	600,0
8% de resina	52,2	8% de resina	52,2	8% de resina	52,2
Tinuvin 123 (0,0%)	0,0	Tinuvin 123 (0,5%)	0,3	Tinuvin 123 (2,0%)	1,0
Tinuvin 405 (0,0%)	0,0	Tinuvin 405 (1,0%)	0,5	Tinuvin 405 (3,0%)	1,6
Massa do compósito	652,2	Massa do compósito	653,0	Massa do compósito	654,8
Mcac	635,07	Mcac	639,26	Mcac	638,01
Mppc	17,1	Mppc	13,7	Mppc	16,8
Mfrc	35,07	Mfrc	38,48	Mfrc	35,40
<b>%Mfrc</b>	<b>5,52%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>6,02%</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>5,55%</b>

Mcac = massa do compósito após cura

Mppc = massa perdida no processamento do compósito

Mfrc = massa final de resina no compósito

%Mfrc = percentual de massa final de resina no compósito

Para a determinação do percentual de massa final de resina que continha no compósito (%Mfrc) as Equações 3.1, 3.2 e 3.3 foram empregadas:

$$M_{ppc} = \sum (M_{rga} - M_{cac}) \quad (3.1)$$

$$M_{frc} = M_r - M_{ppc} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} M_{cac} &= 100\% \text{ de resina no compósito} \\ M_{frc} &= \%M_{frc} \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde:

$M_{ppc}$  = massa perdida no processamento do compósito

$M_{rga}$  = massa da resina, granito e aditivos

$M_{cac}$  = massa do compósito após cura

$M_{frc}$  = massa final de resina no compósito

$M_r$  = massa da resina aplicada na confecção da pedra

$\%M_{frc}$  = percentual de massa final de resina no compósito

Corpos de prova para os ensaios mecânicos de resistência à compressão e flexão foram obtidos através de corte e polimento das placas dos compósitos de resina acrílica com granito Caju. As dimensões dos corpos de prova seguiram as especificações recomendadas pelas normas ISO 178 (flexão) e ABNT NBR 12767 (compressão). Além disso, foram realizados também os ensaios de absorção de água (segundo a norma ASTM D 570) e degradação através de radiação UV em câmara de envelhecimento acelerado, conforme norma ANSI/ASTM G 26-77 (método C).

### 3.5 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM MÁRMORE

#### 3.5.1 Obtenção das Partículas de Mármore Branco

O procedimento para obtenção das partículas de mármore Branco para a produção de compósitos com resina acrílica ocorreu, inicialmente, através do uso de martelos e marretas, quebrando as placas de mármore fornecidas pela marmoraria. Após essa etapa, através do Peneirador Mecânico GF Tipo PFA, uma distribuição granulométrica foi realizada. No processo de obtenção das partículas percebeu-se que o comportamento de quebra das partículas era diferente do granito caju, ou seja, as partículas ficavam com suas dimensões mais homogêneas. Desta forma, fez-se o ensaio de distribuição granulométrica em um Peneirador Mecânico Vibratório GF-PFA, com os minerais resultantes da moagem, sendo que esta foi a características da variação granulométrica empregada nas formulações dos compósitos com resina acrílica. A Tabela 4.9 e Figura 4.28 apresentadas no capítulo 4 mostram a distribuição granulométrica das partículas do mineral mármore tipo Branco que resultaram do

processo de quebra (moagem). Distribuição esta empregada na confecção dos compósitos.

### 3.5.2 Obtenção dos Compósitos via Processo de Compressão

No desenvolvimento dos compósitos de resina acrílica com o mineral mármore, as quantidades mássicas de resina empregadas (10% e 15% em relação ao peso do moldado) foram baseadas nas proporções que foram aplicadas nos compósitos de resina acrílica com o mineral granito Caju.

As etapas de produção dos seis compósitos de resina acrílica com o mineral mármore Branco foram idênticas as realizadas na preparação dos compósitos de resina acrílica com granito Caju. A Tabela 3.4 apresenta as formulações aplicadas na confecção desses compósitos.

Para a determinação do percentual de massa final de resina que continha no compósito (%Mfrc) as Equações 3.1, 3.2 e 3.3 também foram empregadas.

**Tabela 3.4.** Formulações dos compósitos de resina acrílica com mármore branco.

Compósito-1	Massa (g)	Compósito-2	Massa (g)	Compósito-3	Massa (g)
85% de mármore	600,0	85% de mármore	600,0	85% de mármore	600,0
15% de resina	105,8	15% de resina	105,8	15% de resina	105,8
Tinuvin 123 (0,0%)	0,0	Tinuvin 123 (0,5%)	0,53	Tinuvin 123 (2,0%)	2,12
Tinuvin 405 (0,0%)	0,0	Tinuvin 405 (1,0%)	1,06	Tinuvin 405 (3,0%)	3,17
Massa do compósito	705,8	Massa do compósito	707,4	Massa do compósito	711,1
Mcac	659,22	Mcac	661,88	Mcac	662,89
Mppc	46,6	Mppc	45,5	Mppc	48,2
Mfrc	59,22	Mfrc	60,29	Mfrc	57,60
<b>%Mfrc</b>	<b>8,98</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>9,11</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>8,69</b>

Compósito-4	Massa (g)	Compósito-5	Massa (g)	Compósito-6	Massa (g)
90% de mármore	600,0	90% de mármore	600,0	90% de mármore	600,0
10% de resina	66,7	10% de resina	66,7	10% de resina	66,7
Tinuvin 123 (0,0%)	0,0	Tinuvin 123 (0,5%)	0,33	Tinuvin 123 (2,0%)	1,33
Tinuvin 405 (0,0%)	0,0	Tinuvin 405 (1,0%)	0,67	Tinuvin 405 (3,0%)	2,00
Massa do compósito	666,7	Massa do compósito	667,7	Massa do compósito	670,0
Mcac	649,23	Mcac	651,23	Mcac	650,85
Mppc	17,5	Mppc	16,5	Mppc	19,2
Mfrc	49,23	Mfrc	50,23	Mfrc	47,52
<b>%Mfrc</b>	<b>7,58</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>7,71</b>	<b>%Mfrc</b>	<b>7,30</b>

Mcac = massa do compósito após cura

Mppc = massa perdida no processamento do compósito

M<sub>frc</sub> = massa final de resina no compósito  
%M<sub>frc</sub> = percentual de massa final de resina no compósito

### 3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 3.6.1 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão

Os ensaios de compressão foram conduzidos em máquina universal de ensaios Wolpert, segundo a norma da ABNT NBR 12767, utilizando-se célula de carga de 20.000 kgf e velocidade ensaio de 10 mm/min. Para a obtenção da tensão máxima de compressão, foi empregado 1 corpo de prova para cada composição de compósito de resina Poliéster com granito Caju e, 3 corpos de provas para cada composição mássica de resina Acrílica, antes da exposição destes a radiação ultravioleta e, voltou-se a empregar 1 corpo de prova para cada composição de resina Acrílica, após a exposição destes a radiação ultravioleta. A Figura 3.4 apresenta o rompimento de um corpo de prova de compósito de resina com granito Caju através do ensaio de compressão.



**Figura 3.4.** Ensaio de resistência à compressão (corpo de prova sendo rompido).

#### 3.6.2 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados de acordo com a norma ISO 178, sendo que o método adotado foi o de flexão em 3 pontos (o corpo de prova retangular ficava apoiado nas duas extremidades e recebia o esforço de flexão no

centro, conforme Figura 3.5). Tal ensaio foi conduzido em máquina universal de ensaios Kratos, com célula de carga de 500 Kgf e velocidade de ensaio de 1 mm/min. Para a obtenção da tensão máxima de flexão, foram empregados os mesmos números de corpos de provas, conforme citados no item 3.6.1



**Figura 3.5.** Ensaio de resistência à flexão em três pontos.

### 3.6.3 Ensaio de Microscopia Óptica

Com o objetivo de avaliar a variação granulométrica das partículas minerais contidas nas pedras sintéticas – Pedra 1 e Pedra 2, para que essa variação granulométrica pudesse ser um referencial a ser empregado nas formulações das partículas de granito Caju e mármore utilizados na produção dos compósitos com resina Acrílica, análises de microscopia óptica foram realizadas em Analisador de Imagem Olympus BX 51 (modelo PL-A642).

Durante essas análises fizeram-se imagens das pedras sintéticas nas regiões onde eram visíveis partículas com maiores granulometrias e nas regiões de partículas com menores granulometrias, obtendo-se assim uma média entre as dimensões das partículas encontradas. A distribuição granulométrica foi obtida da média de oito campos (ou regiões) analisados onde se verificava em cada região seis partículas aleatoriamente. Este procedimento é empregado no Laboratório de Materiais da Sociesc, que é embasado nas normas ABNT – MB-1512 (1990) e ASTM E112 – 96 (2004).

### 3.6.4 Ensaio de Teor de Cinzas

Com o objetivo de determinar a quantidade de resina termofixa (polímero) presente em pedras sintéticas, realizou-se o ensaio de teor de cinzas na Pedra 1. Tal ensaio foi realizado em triplicada e com amostras de aproximadamente 60 g.

Cada amostra foi pesada em balança analítica Sartorius BA 02 (0,0001 g de precisão) e colocada em cadinho de cerâmica. Os cadinhos foram levados para queima em forno Mufla Callmex Q-318M24 (temperatura máxima de 1200°C) por 1,5 horas à 400°C. Ao final dessa primeira queima, fez-se uma análise visual das amostras no interior do cadinho e constatou-se que o polímero ainda estava presente. Então, aumentou-se a temperatura para 600°C, sendo que as amostras ficaram nessa temperatura por 2 horas. Ao final dessa segunda queima, percebeu-se que os minerais aparentavam-se soltos e limpos e que não havia mais polímero presente. Os cadinhos com as amostras foram então resfriados em dessecador até a temperatura ambiente. Calculou-se o teor de resina termofixa que estava presente na pedra sintética através da diferença de massa que as amostras apresentaram antes e depois da queima total. Os cálculos estão representados no Apêndice E.

### 3.6.5 Ensaio de Distribuição Granulométrica

As partículas minerais obtidas da pedra sintética – Pedra 1 (ao final do ensaio de teor de cinzas) foram conduzidas para o ensaio de distribuição granulométrica em um Peneirador Mecânico Vibratório GF-PFA, de acordo com a norma CEMP 081. O objetivo desse ensaio foi classificar as dimensões das partículas minerais presentes na pedra sintética - Pedra 1.

Efetou-se a pesagem de cada uma das peneiras vazias (onze no total, sendo a maior com malha de 3,36 mm (6 mesh) e a menor com malha de 0,053 mm (270 mesh) e colocou-se cerca de 50 g de cada amostra na peneira superior e manteve-se o peneirador vibrando por 15 min. Após o término do ensaio, as peneiras foram pesadas com as partículas e obteve-se assim a quantidade de partículas minerais presentes na pedra sintética – Pedra 1, de acordo com a variação granulométrica das partículas.



### 3.6.6 Ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Foi realizado FTIR nas resinas termofixas Poliéster, Acrílica e na pedra sintética - Pedra 1. O objetivo de identificar as bandas características dos grupos funcionais orgânicos, foi correlacionar tais agrupamentos com as estruturas moleculares dessas resinas apresentadas na literatura, bem como, correlaciona-las entre si para se ter assim uma noção do tipo de resina termofixa utilizada na fabricação de pedras sintéticas.

As análises de FTIR foram executadas em equipamento Thermonicolet – IR 200 Spectrometer, modo absorbância, de 4000 a 450  $\text{cm}^{-1}$ . As amostras de resinas foram preparadas na forma de pastilhas encapsuladas com brometo de potássio para serem adaptadas ao equipamento de FTIR. Para a obtenção da amostra de resina contida na pedra sintética – Pedra 1, fez-se uma raspagem da pedra procurando coletar somente a parte da resina polimérica, procurando-se evitar partes minerais que pudessem gerar contaminações.

### 3.6.7 Ensaio de absorção de água

Foi realizado ensaio de absorção de água em corpos de prova dos compósitos de resina Acrílica com granito Caju e resina Acrílica com mármore Branco. A norma utilizada foi a ASTM D 570, onde os corpos de provas dos compósitos foram condicionados por 24 horas em uma estufa FANEM – MOD. 320-SE com temperatura de  $50 \pm 3^\circ\text{C}$ . Após isso, os corpos de provas foram resfriados em dessecador e pesados em balança analítica Sartorius BA 02 (0,0001g de precisão). Na sequência, os corpos de provas foram imersos em água destilada em temperatura de  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  por 24 horas e pesados novamente. O cálculo do percentual de absorção de água foi efetuado através da Equação 3.4:

$$\% \text{ Absorção de água} = \frac{\text{Massa do CP úmido} - \text{Massa do CP condicionado}}{\text{Massa do CP condicionado}} \times 100 \quad (3.4)$$

Sendo: CP = corpo de prova

### 3.6.8 Ensaio de Degradação através de Radiação UV

Corpos de provas dos compósitos de resina Acrílica com granito Caju e resina Acrílica com mármore Branco foram expostos à radiação ultravioleta (UV) num período de 18 dias, de acordo com as condições estabelecidas pela norma ANSI/ASTM G 26-77 (método C), em câmara de envelhecimento acelerado, com 8 lâmpadas UV, desenvolvida pelo Lab. Eng. Química da UFSC.

Os corpos de provas colocados na câmara de envelhecimento acelerado por radiação UV foram monitorados durante a permanência em seu interior, com temperatura controlada em  $63 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Essas amostras de compósitos foram fotografadas nos períodos de 1, 2, 3, 5, 10, 15, e 18 dias de degradação.

## 3.7 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

### 3.7.1 Viabilidade Econômica de Compósitos com Resinas Termofixas com Mineral Granito e Mármore

Para este estudo aplicaram-se informações obtidas de entrevistas com fabricantes de produtos em mármore e granito; marmoraria Dalsasso, marmoraria Schmidt. Também distribuidores de matérias primas (resinas, aditivos, catalisadores) CRE, empresas da cidade de Joinville-SC, Ara Química, cidade de Araçatuba, estado de São Paulo. Neste estudo levou-se em consideração o desenvolvimento dos Compósitos obedecendo ao processamento de chapas individuais e não blocos para posteriormente serem cortadas por teares (casos que a maioria dos fabricantes de pedras sintéticas como Europeus e Americanos usam em seus processos).

Para a determinação do valor aproximado adotamos a resina termofixa Poliéster e não a resina Acrílica, fato este devido a resina Acrílica não ser comercializada no Brasil. Por via das dúvidas (informação obtida por contato informal) esta resina Acrílica poderia ter um acréscimo do custo comparado a Poliéster em torno de 50% por quilograma. Outros materiais e operações, considerados para análises de viabilidade econômica foram os aditivos de ultravioleta, catalisador, solução de limpeza, energia consumida por uma prensa, estufa, misturador, o custo de três homens na produção, o custo de rejeitos das pedras naturais, transporte e moagem das mesmas, beneficiamento das pedras sintéticas e algumas perdas (supondo controle de qualidade) e impostos.

Adotou-se para o cálculo total do custo do metro quadrado da pedra sintética a sequência das fases de produção:

- a) Quantidade do mineral granito necessária para confeccionar  $1\text{m}^3$  de pedra sintética;
- b) Determinação do número de pedras que podemos desenvolver em um bloco de  $1\text{m}^3$ ;
- c) Custos de moagem do metro cúbico do granito;
- d) Custo da resina para 50 pedras;
- e) Custo dos aditivos contra radiação ultravioleta;
- f) Custo do catalisador;
- g) Custo de material para limpeza (solução de limpeza), para molde, equipamentos e outros acessórios;
- h) Determinação do tempo de produção;
- i) Custo de mão -de -obra;
- j) Custo do consumo do equipamento prensa;
- k) Custo do consumo do equipamento estufa;
- l) Custo do consumo de um misturador;
- m) Custo do beneficiamento;
- n) Preço dos rejeitos de mármore e granitos;
- o) Transporte dos rejeitos;
- p) Custos de controle de qualidade;
- q) Custos de retrabalhos;
- r) Custo total da produção.

Após a estimativa de todos os cálculos fez-se uma análise com os entrevistados anteriormente citados para verificar se as condições estavam dentro da realidade industrial.

Os dados referentes aos estudos da viabilidade econômica estão representados no Apêndice F.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 COMPÓSITOS DE RESINA POLIÉSTER COM GRANITO CAJU

#### 4.1.1 Processamento por Compressão e Aparência Visual dos Compósitos

Com relação ao processamento dos compósitos via compressão, foi observado que durante a fase de compressão da pedra sintética ocorreu quebra das partículas maiores (acima de 3,36 mm), gerando um compósito sem uma suficiente umectação da resina poliéster. Nesse caso, obteve-se o esfacelamento do compósito, evidenciando fraca adesão entre as partículas minerais e a resina.

Durante a produção dos compósitos de resina poliéster com granito Caju, percebeu-se que o excesso de força de fechamento utilizada para a compactação dos componentes da mistura também causava quebra das partículas minerais, as quais rompiam e ficavam visíveis, desprendendo-se do compósito. Dessa forma, os melhores compósitos foram obtidos com força de fechamento de 40 toneladas, pois abaixo desse valor os compósitos apresentaram baixa coesão entre as fases resina e mineral, e acima desse valor, ocorreu à quebra das partículas e o esfacelamento do compósito. De modo geral, os compósitos obtidos com força de fechamento de 40 toneladas e tempo de cura de 60 minutos ficaram com aparência similar ao granito natural tipos Caju.

Quanto à aparência visual (estética), obteve-se um incremento do brilho dos compósitos após o processo de polimento, o que elevou ainda mais a semelhança dos compósitos, comparado com o granito Caju in natura (Figura 4.1).



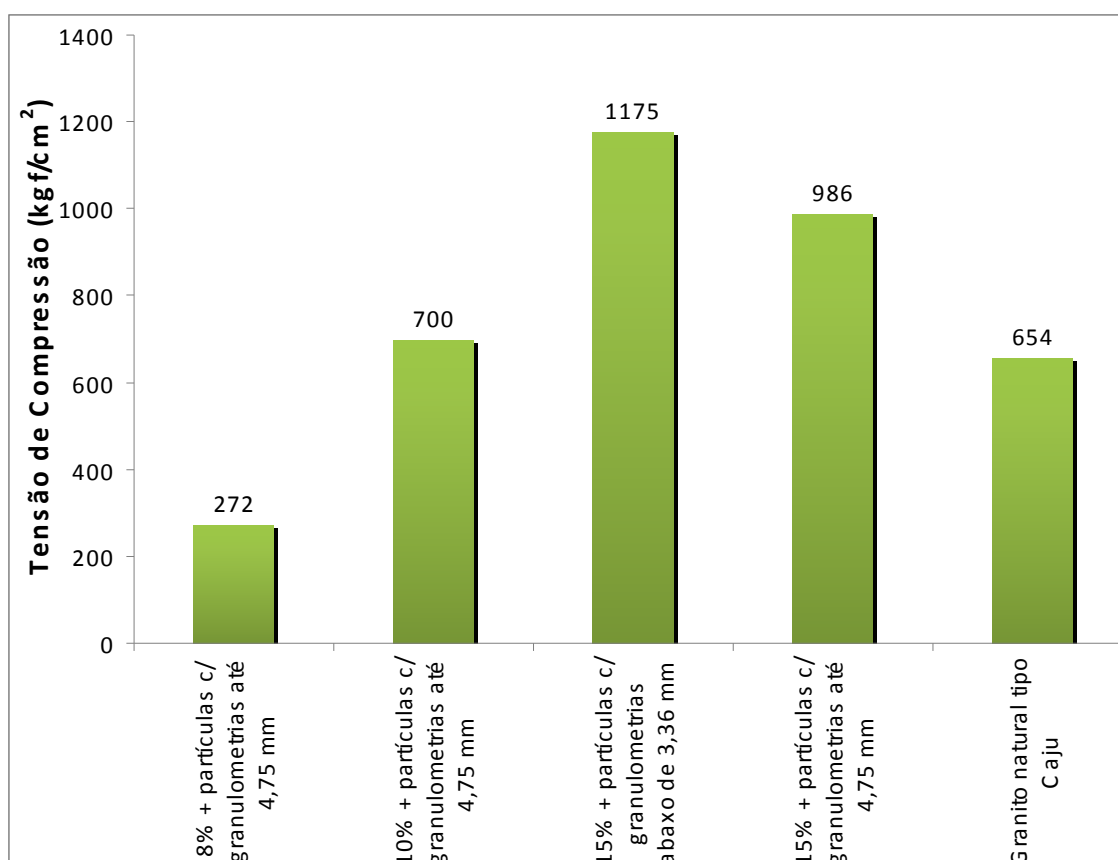
**Figura 4.1.** Aparência visual dos compósitos de resina poliéster com granito Caju.

#### 4.1.2 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão

Os resultados obtidos de resistência à compressão dos compósitos de resina poliéster com granito Caju, bem como os resultados relativos ao granito natural, são apresentados na Tabela 4.1 e Figura 4.2.

**Tabela 4.1.** Resistência à compressão dos compósitos de resina com granitos Caju obtidos por compressão.

Quantidade mássica de resina no compósito e dimensão das partículas	Força máxima (kgf)	Área do CP (cm <sup>2</sup> )	Tensão de compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
8% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	4250	15,61	272
10% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	13400	19,12	700
15% + partículas c/ granulomet. abaixo de 3,36 mm)	18200	15,49	1175
15% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	16500	16,63	986
Granito natural tipo Caju	18000	27,53	654



**Figura 4.2.** Resistência à compressão dos compósitos de resina poliéster com granito Caju obtido por compressão.

Os resultados obtidos de resistência à compressão indicaram que no compósito com 8% (em massa) de resina, essa quantidade foi insuficiente para unir

uniformemente as partículas minerais, não conseguindo penetrar nos interstícios vazios, deixando o compósito com aparência porosa e pouco resistente. Percebeu-se que ocorreu o esfacelamento desse compósito quando submetido a uma tensão de compressão de 272 kgf/cm<sup>2</sup>.

No caso do compósito com 10% (em massa) de resina, acredita-se que a resistência à compressão foi superior à do compósito com 8% de resina devido à maior quantidade de resina poliéster, que proporcionou melhor adesão entre as partículas minerais, reduzindo a porosidade, ou seja, preenchendo melhor os poros entre essas partículas. Pode-se dizer que os defeitos entre as fases orgânicas e inorgânicas do compósito foram reduzidos em função da maior quantidade do polímero usada na formulação.

No compósito com formulação de 15% (em massa) de resina poliéster e granulometria até 4,75 mm, obteve-se um aumento da resistência de compressão em relação à formulação com 10% de resina. Esse resultado sugere que com o aumento da área superficial das partículas o compósito suportou melhor o esforço de compressão. Tal característica, associada a maior quantidade de resina (a qual auxiliou no preenchimento dos espaços entre as partículas e garantiu a melhor interação entre os componentes) produziu um compósito mais resistente à compressão em relação aos compósitos com 8% e 10% de resina (em massa). Entretanto, percebeu-se uma elevação do nível de porosidade, que pode ter ocorrido devido as maiores dimensões das partículas de granito, o que facilitou a disposição da formação dos interstícios entre as partículas minerais.

Obteve-se uma elevada resistência à compressão do compósito de 15% (em massa) de resina e partículas com granulometrias abaixo de 3,36 mm. Tal compósito suportou 1175 kgf/cm<sup>2</sup> de tensão de compressão sem apresentar trincas, apenas uma leve deformação. Já o granito Caju natural apresentou trincas devido às discordâncias e defeitos interfaciais dos cristais que apresentaram escorregamento e, na seqüência se rompeu a uma tensão de compressão de 653 kgf/cm<sup>2</sup>. Tal resultado sugere que a maior resistência à compressão do compósito com 15% (em massa) de resina foi devido a melhor acomodação entre as partículas, gerando a característica da formação de interstícios com penetração suficiente da resina, eliminando o máximo possível de porosidade e, proporcionando maior quantidade de resina no compósito, onde o meio contínuo do compósito (resina) resistiu mais intensamente às deformações elásticas, devido à boa disposição da carga inorgânica (fase descontínua) que agiu como componente estrutural, absorvendo parte da energia de compressão (CALLISTER, 2002). Portanto a característica final do produto com maior intensidade de resina possibilitou elevar a quantidade de cadeias poliméricas

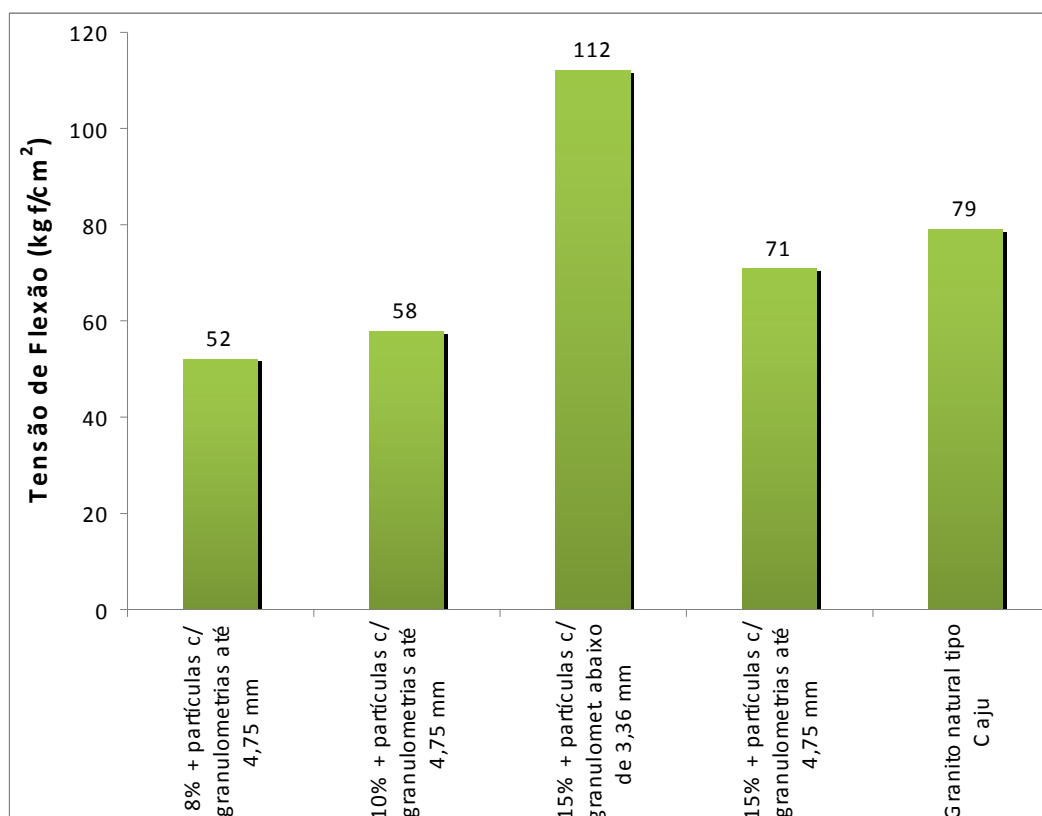
reticuladas em torno das partículas minerais, que conseqüentemente, aumentou o nível de energia englobando a fase mineral do compósito, proporcionando maior resistência à compressão.

#### 4.1.3 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão

Os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos de resina poliéster com granito Caju, bem como os resultados relativos ao granito natural, são apresentados na Tabela 4.2 e Figura 4.3.

**Tabela 4.2.** Resistência à flexão dos compósitos de resina poliéster com granitos Caju obtidos por compressão.

Quantidade mássica de resina no compósito e dimensão das partículas	Força máxima (kgf)	Tensão de flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )
8% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	20,50	52
10% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	27,50	58
15% + partículas c/ granulomet. abaixo de 3,36 mm)	30,00	112
15% + partículas c/ granulometrias até 4,75 mm	24,75	71
Granito natural do tipo granito rosa	79,23	79



**Figura 4.3.** Resistência à flexão dos compósitos de resina poliéster com granitos Caju obtidos por compressão.

O compósito com 8% (em massa) de resina apresentou resultado regular em relação à tensão de flexão comparado com o granito natural. Acredita-se que a quantidade de 8% de resina permitiu à incidência de porosidades no compósito e, conseqüentemente, menor a aglomeração entre as partículas. Tal comportamento gerou um compósito frágil, que quebrou facilmente quando exposto ao esforço de flexão. Comparado ao granito natural, esse compósito apresentou 34% menos resistência à propriedade de tensão de flexão.

O compósito com 10% (em massa) de resina mostrou-se 27% menos resistente à tensão de flexão em relação ao granito natural. Entretanto, esse compósito foi 11% mais resistente do que o compósito com 8% (em massa) de resina. O resultado indica que a quantidade de resina termofixa presente no compósito influencia no comportamento mecânico de flexão. Percebeu-se que a maior quantidade de resina melhora a aglomeração das partículas minerais no compósito e diminui a porosidade, conseqüentemente maior resistência a deformação elástica devido a maior consistência dos movimentos moleculares do meio contínuo (resina) em respostas as tensões de flexão aplicadas.

No compósito com 15% (em massa) de resina e com granulometrias até 4,75 mm, constatou-se que com tal percentual de resina, o compósito ficou 10% menos resistente que o granito natural. Porém, comparado ao compósito com 8% (em massa) de resina, obteve-se uma aumento de 27% na resistência à flexão e, comparado ao compósito com 10% (em massa) de resina, obteve-se uma elevação da propriedade em 18%. Tal resultado também sugere que uma maior quantidade de resina termofixa no compósito com granito Caju eleva a resistência à flexão, conforme comentários já citados anteriormente.

Considerando-se agora a resistência à flexão do compósito de 15% (em massa) de resina com granulometrias abaixo de 3,36 mm, em relação aos outros compósitos com granulometrias maior verificou-se que o resultado obtido foi superior, ou seja, um aumento de 41% da propriedade comparado ao granito natural. Tal resultado indica que uma granulometria com dimensões menores das partículas, juntamente a maior quantidade de resina, facilita a junção (disposição) das partículas minerais entre si, deixando o compósito com uma melhor compactação (interação) e menor porosidade, em função da melhor união dos componentes, bem como, podemos afirmar os comentários citados anteriormente, em relação à resistência à compressão. Resumindo: quanto maior foi a quantidade da fase contínua nos compósitos e menor as partículas da fase descontínua, maiores foram as resistências as deformações elásticas devido a maior interação entre os componentes orgânicos



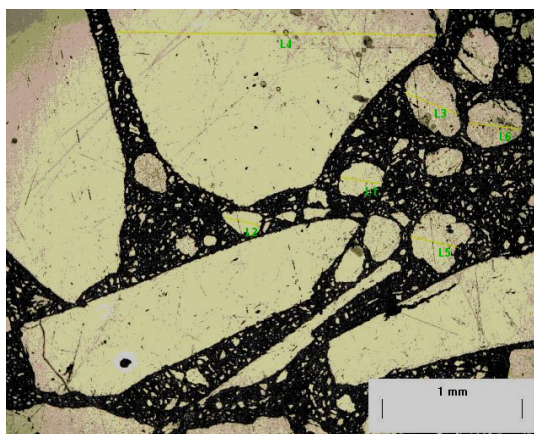
devido ao aumento de energia de reticulação, que garantiu maior coesão da fase inorgânica que deu consistência ao sistema absorvendo as tensões externas.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PEDRAS SINTÉTICAS

### 4.2.1 Ensaio de Microscopia Óptica na Pedra Sintética – Pedra 1

A Figura 4.4 apresenta uma micrografia da superfície superior lisa com aumento de 50 vezes da Pedra 1. A distribuição granulométrica obtida da média de oito campos (regiões) analisadas, onde verificava-se em cada região seis partículas (L1, L2, L3, L4, L5 e L6), foram dimensionadas através do *software* do microscópio óptico. O resultado dessa distribuição é apresentado na Figura 4.5.

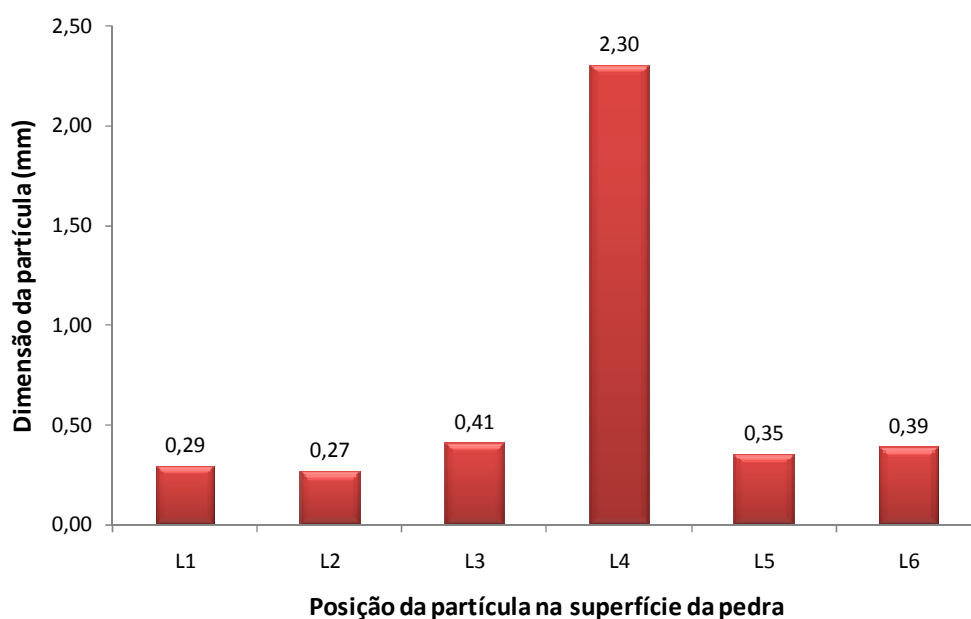
Observou-se que a distribuição granulométrica da Pedra 1 obtida na região de partículas com maiores dimensões (Figura 4.4), variaram entre 0,265 e 2,301mm (Figura 4.5). Esta variação pode ser melhor avaliada através do gráfico apresentado na Figura 4.6, onde se verifica que 83% das partículas analisadas apresentam dimensões (aproximadamente forma geométrica de um diâmetro) abaixo de 0,4 mm, ou seja, da média das áreas analisadas, onde seis partículas eram medidas, somente uma granulometria apresentou variação dimensional (aproximadamente forma geométrica de um diâmetro) de 2,301mm, que representa 17% da região analisada da pedra sintética



**Figura 4.4.** Região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1, (escala 1 mm, aumento de 50x).

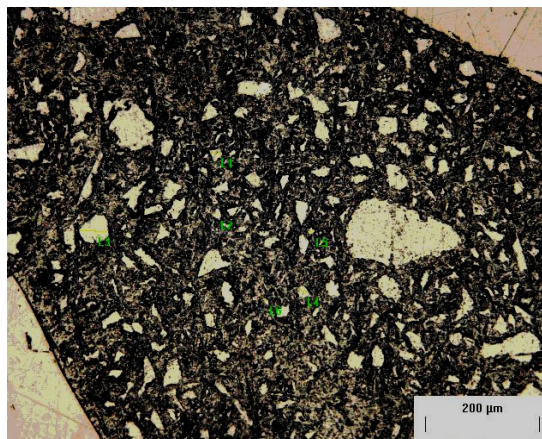
Features   Measurements   Input/Output   Options   Advanced Opt.					
	Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length
1	L1	2,536145	1,222892		,2931452
2	L2	1,683735	1,512048		,2659487
3	L3	3,033133	,6716867		,4083075
4	L4	1,927711	,1777108		2,301276
5	L5	3,063253	1,659639		,3521907
6	L6	3,493976	,8343373		,3878414

**Figura 4.5.** Características das medidas da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da Pedra 1.



**Figura 4.6.** Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões pedra sintética – Pedra 1.

A Figura 4.7 apresenta uma micrografia da superfície superior lisa da Pedra 1 numa região de partículas com menores dimensões. O método de análise da distribuição granulométrica foi o mesmo citado no item 4.2.1, onde a média das dimensões de seis partículas dessa região (L1, L2, L3, L4, L5 e L6) foram avaliadas através do *software* do microscópio óptico, e os resultados são mostrados na Figura 4.8.

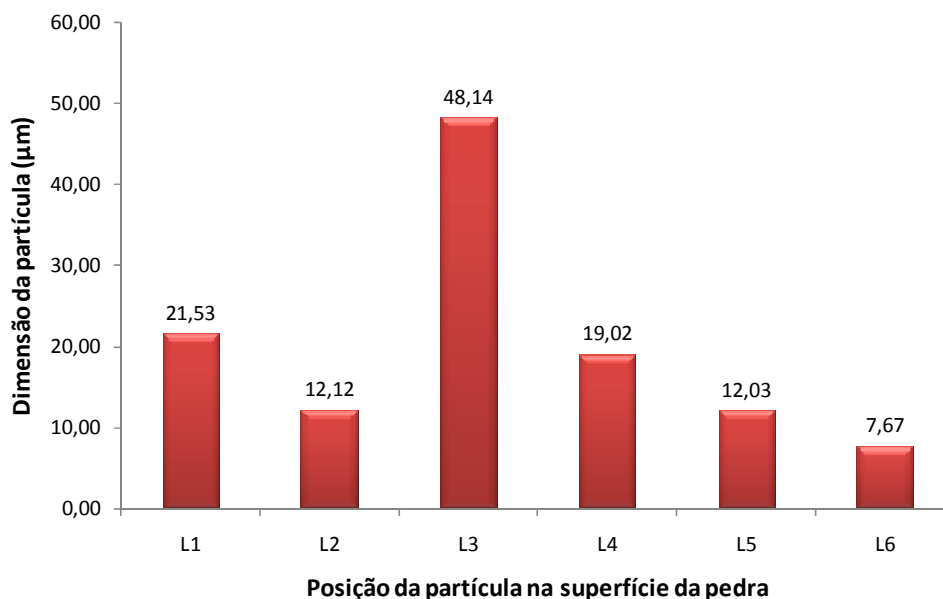


**Figura 4.7.** Região de partículas com menores dimensões da pedra sintética – Pedra 1, (escala 200  $\mu\text{m}$ , aumento de 200x).

Observou-se que a distribuição granulométrica da Pedra 1 obtida na região de partículas com menores dimensões (Figura 4.7), variaram entre 12,030 e 48,144  $\mu\text{m}$  (Figura 4.8). Tal distribuição pode ser mais bem interpretada através do gráfico apresentado na Figura 4.9, onde se observa que 100% das partículas analisadas apresentam dimensões (aproximadamente forma geométrica de um diâmetro) abaixo de 50  $\mu\text{m}$ , ou seja, abaixo de 0,05 mm.

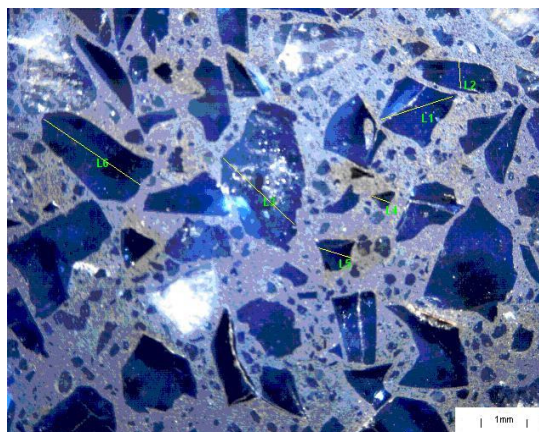
Features   Measurements   Input/Output   Options   Advanced Opt.					
	Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length
1	L1	366,9173	253,3835		21,53056
2	L2	367,6692	360,9023		12,12370
3	L3	151,8797	390,2256		48,14379
4	L4	518,7970	494,7368		19,02122
5	L5	533,8346	390,9774		12,03008
6	L6	453,3835	510,5263		7,667699

**Figura 4.8.** Características das medidas da região de partículas com menores dimensões da Pedra 1



**Figura 4.9.** Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de menores dimensões da pedra sintética – Pedra 1.

Através do método stereo do analisador de imagem Olympus BX 51, conseguiu-se captar uma micrografia tridimensional da superfície superior lisa da Pedra 1 (Figura 4.10), numa região onde as partículas eram visivelmente maiores. O objetivo dessa análise foi melhorar a visualização dos tamanhos das partículas.



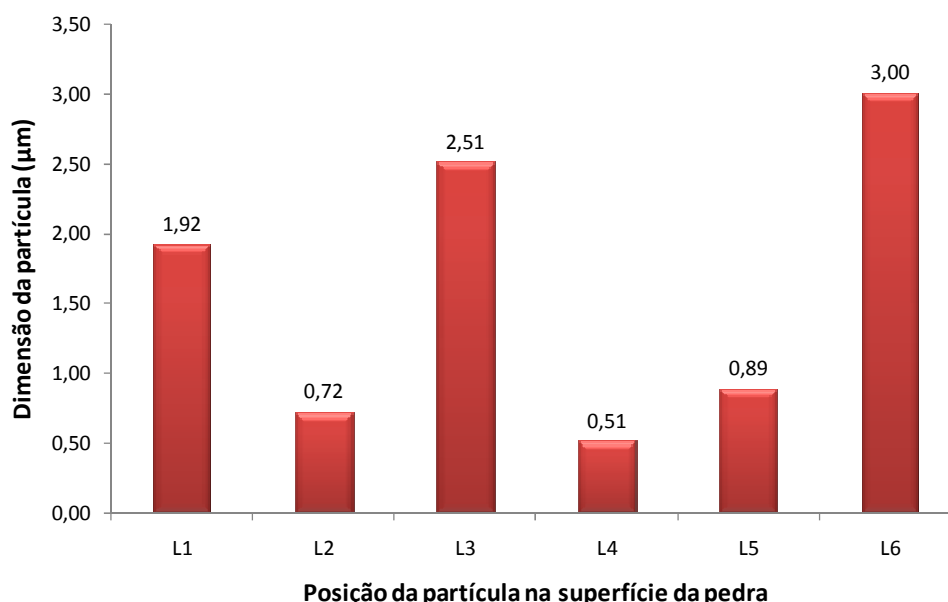
**Figura 4.10.** Região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1. Método tridimensional (escala 1 mm, aumento de 13,4x).

Observa-se que a distribuição granulométrica da Pedra 1 obtida nas regiões de partículas com maiores dimensões, visão tridimensional (Figura 4.10), variaram entre 0,509 e 3,003mm (Figura 4.11). Esta variação pode ser mais bem interpretada através do gráfico mostrado na Figura 4.12, onde se verifica que as partículas

analisadas apresentam dimensões (aproximadamente forma geométrica de um diâmetro) onde cerca de 50% das partículas possuem dimensões abaixo de 1,0mm, 33% entre 1,0 e 2,0 mm e 17% entre 2,0 e 3,0 mm.

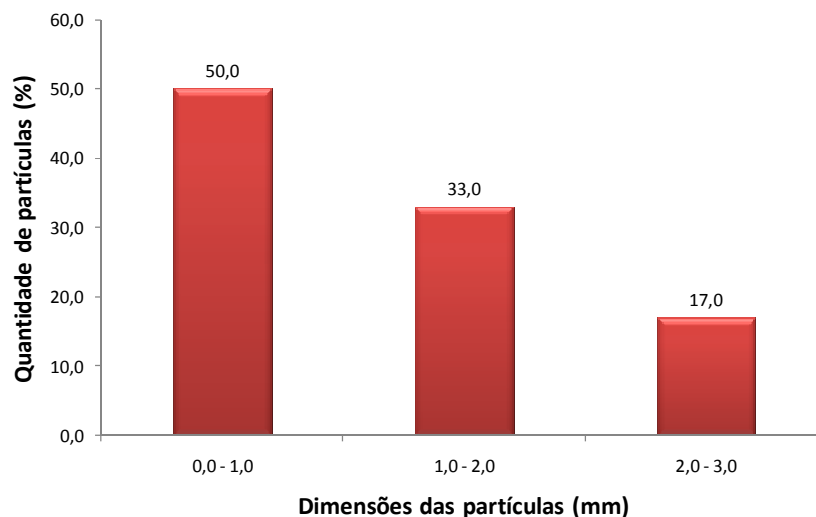
Features   Measurements   Input/Output   Options   Advanced Opt.					
	Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length
1	L1	10,47826	2,554348		1,918101
2	L2	11,56522	1,706522		,7187076
3	L3	6,434783	4,706522		2,506796
4	L4	9,565217	4,913043		,50890
5	L5	8,380435	6,282609		,8870524
6	L6	2,173913	3,695652		3,002834

**Figura 4.11.** Características das medidas da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da Pedra 1. Método tridimensional.



**Figura 4.12.** Representação média da distribuição granulométrica da região de granulometrias com partículas de maiores dimensões da pedra sintética – Pedra 1. Método tridimensional.

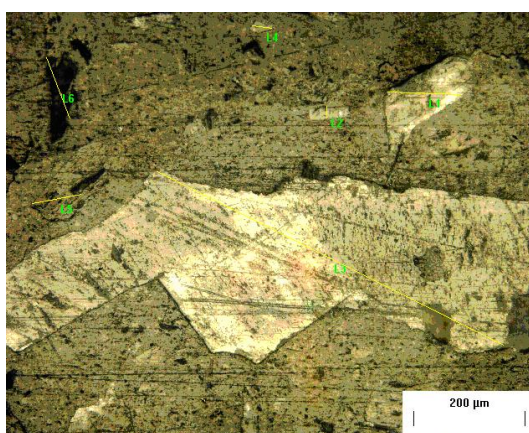
Com os resultados obtidos através das análises de microscopia óptica em diferentes regiões (granulometrias com maiores e menores partículas) da pedra sintética – Pedra 1, verificou-se que essa pedra é produzida com uma formulação onde a variação granulométrica obedece os parâmetros aproximados na qual 50% das dimensões das partículas minerais estão abaixo de 1,0 mm, 33% entre 1,0 e 2,0mm e 17% entre 2,0 e 3,0mm (Figura 4.13).



**Figura 4.13.** Variações granulométricas da Pedra 1 observadas em microscopia óptica.

#### 4.2.2 Ensaio de Microscopia Óptica na Pedra Sintética – Pedra 2

Após várias análises de microscopia óptica, conforme procedimento citado no item 3.6.3, em diferentes regiões (aqui citadas por região 1 e região 2) da superfície superior lisa da pedra sintética - Pedra 2 percebeu-se que a distribuição granulométrica de modo geral, em qualquer região da pedra, apresentava dimensões das partículas menores que 1,0 mm, conforme mostram as Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.



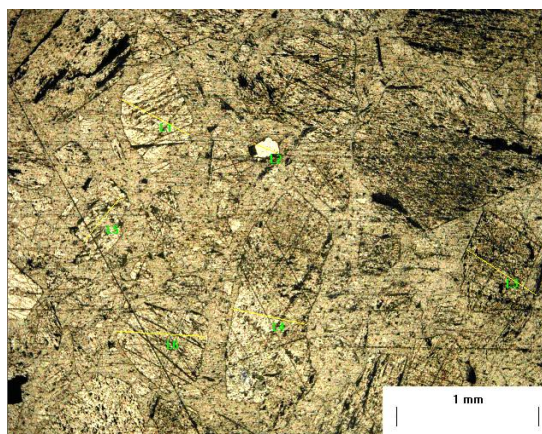
**Figura 4.14.** Região 1 da variação granulométrica da pedra sintética – Pedra 2, (escala 200 μm, aumento de 200x).



Features   Measurements   Input/Output   Options   Advanced Opt.					
	Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length
1	L1	752,6316	145,1128		136,9164
2	L2	575,9398	178,9474		21,05263
3	L3	582,7068	441,3534		697,3845
4	L4	460,1504	26,31579		36,37109
5	L5	90,97744	334,5865		90,25062
6	L6	93,23308	136,0902		117,5724

**Figura 4.15.** Características das medidas das granulometrias da região 1 da pedra sintética – Pedra 2

Através da análise dos resultados apresentados na Figura 4.15, verifica-se que a variação da granulometria das partículas da região 1 ficou entre 21,053 e 697,384  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.16.** Região 2 da variação granulométrica da pedra sintética – Pedra 2, (escala 1mm, aumento de 50x).

Features   Measurements   Input/Output   Options   Advanced Opt.					
	Features	Center X Pos.	Center Y Pos.	Area	Length
1	L1	1,039157	,7620482		,5524461
2	L2	1,816265	,9849398		,1756311
3	L3	3,475904	1,861446		,5914669
4	L4	1,834337	2,171687		,5482259
5	L5	,6626506	1,481928		,4365704
6	L6	1,084337	2,295181		,6275478

**Figura 4.17.** Características das medidas das granulometrias da região 2 da pedra sintética – Pedra 2.

Através da análise dos resultados apresentados na Figura 4.17, verifica-se que a variação das granulometrias das partículas da região 2 da Pedra 2 ficaram entre 0,176 e 0,627mm.

Sendo assim, os resultados das análises de microscopia óptica em diferentes regiões da pedra sintética – Pedra 2 revelaram que as partículas presentes têm dimensões menores que 1,0 mm. A maior partícula observada foi de 627  $\mu\text{m}$ , ou seja, 0,627 mm.

Comparando-se os resultados de microscopia óptica das pedras sintéticas – Pedra1 e Pedra 2, observou-se que a Pedra 2 apresenta variação granulométrica com dimensionais de partículas muito inferiores às dimensões das partículas da Pedra 1.

Sendo assim, para as formulações dos compósitos com resina acrílica a serem produzidos nesse trabalho, optou-se por seguir o padrão granulométrico da Pedra 1, pois o objetivo era trabalhar com partículas minerais com granulometrias maiores, em função de que estas podem melhorar o brilho após o polimento do compósito (garantir o brilho que é a característica positiva das pedras naturais).

#### 4.2.3 Ensaio de Teor de Cinzas na Pedra Sintética – Pedra 1

Optou-se somente por caracterizar a quantidade de resina termofixa contida na Pedra 1 devido aos resultados da variação granulométrica obtidos através do ensaio de microscopia óptica, que ficaram próximos da faixa indicada na literatura entre 0,1 a 6,0 mm (COMPAC MARMOL E QUARTZ, 2006).

Das três amostras analisadas, admitindo-se que o resíduo que sofreu a queima compreendia a parcela total de polímero termofixo na pedra, obtiveram-se então as quantidades mássicas de 7,95%, 8,15% e 8,09% de resina termofixa contida nas amostras da pedra sintética – Pedra 1, respectivamente. Estes cálculos estão representados no Apêndice E.

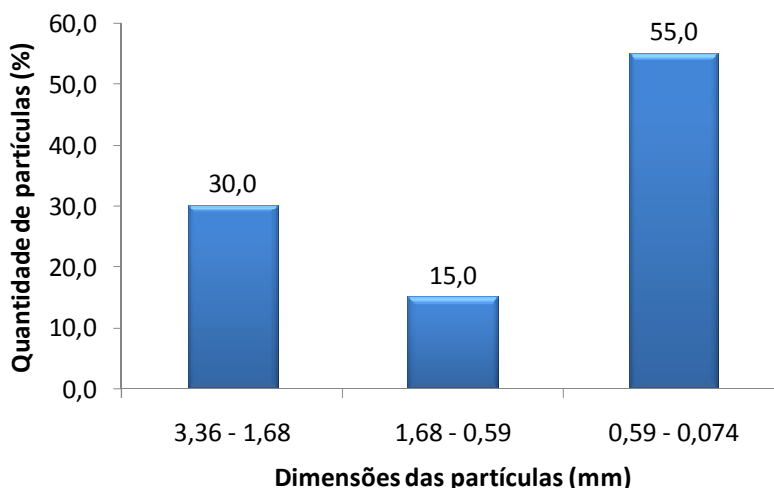
Sendo assim, pode-se quantificar a média de resina polimérica termofixa existente na pedra sintética – Pedra 1 como sendo de aproximadamente 8%, ou seja, 92% (em massa) dessa pedra sintética é composta de mineral granito.

Segundo o fabricante de pedras sintéticas (CAESARSTONEUS, 2007) este aplica em suas formulações a quantidade de 93% de quartzo agregada a 7% de pigmentos e resina polimérica. Isto mostra que o ensaio do teor de cinza desenvolvido tem propriedade devido a mostrar os resultados quase idênticos ao que é aplicado na realidade industrial.

#### 4.2.4 Ensaio de Distribuição Granulométrica das Partículas Minerais da Pedra Sintética – Pedra 1



Os resultados obtidos nas análises de distribuição granulométrica, ver Apêndice G, indicaram que aproximadamente 30% das dimensões das partículas minerais da pedra sintética (Pedra 1) se encontram acima de 1,68 mm, ou seja, foram retidas na malha da peneira 12 mesh e não foram retidas na malha da peneira de 6 mesh. Além disso, obteve-se que 15% das partículas minerais ficaram retidas na malha da peneira de 20 mesh, ou seja, possuem aproximadamente 0,84 mm. Também ficou evidente que uma grande quantidade das partículas minerais, aproximadamente 55%, apresenta granulometria abaixo de 0,59 mm até 0,074mm, ou seja, ficaram retidas entre as malhas de 30 a 200 mesh (Figura 4.18).



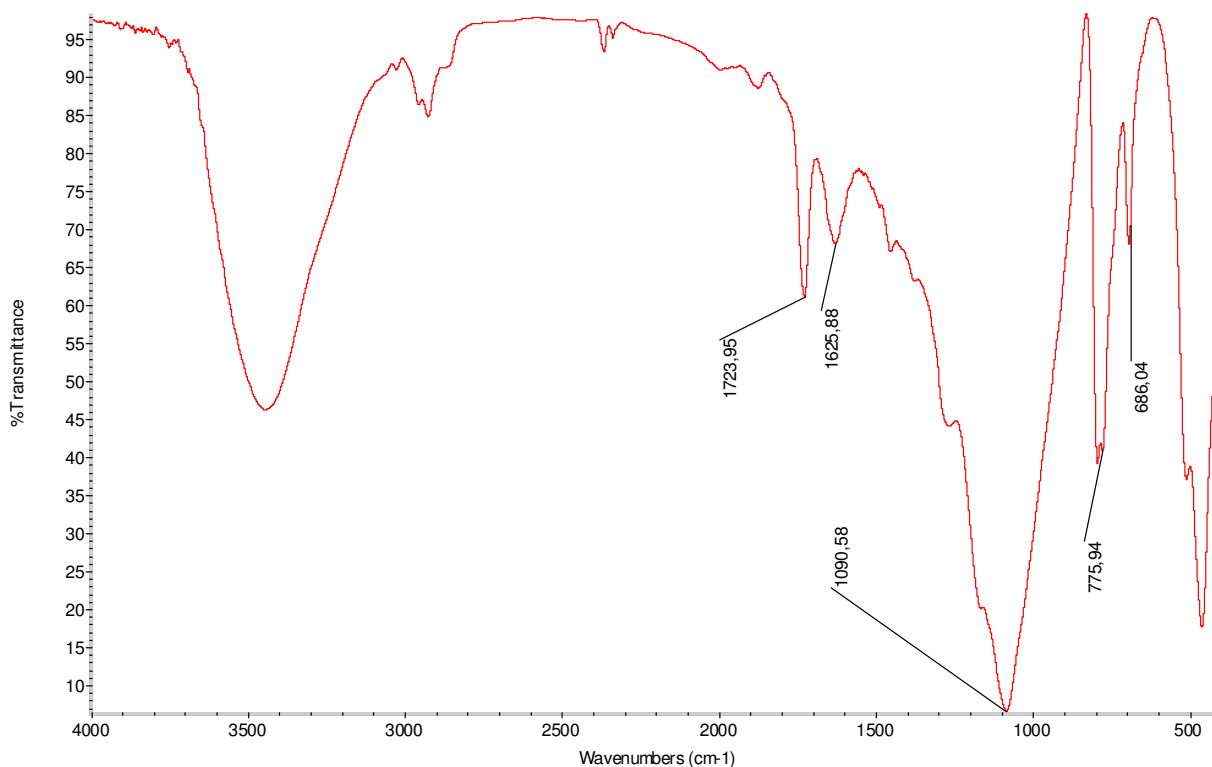
**Figura 4.18.** Variações granulométricas da Pedra 1 obtidas no ensaio de distribuição granulométrica.

#### 4.2.5 Ensaio de FTIR na Resina Polimérica da Pedra Sintética - Pedra 1

Com o objetivo de identificar o tipo de resina polimérica utilizada na produção da pedra sintética (Pedra 1) fez-se análise de FTIR na resina desta pedra sintética e procurou-se identificar os grupos funcionais orgânicos, comparando-se os valores das bandas obtidos com a literatura (SILVERSTEIN *et al.*, 2000). Para auxiliar nesta identificação fez-se também análises de FTIR nas resinas de Poliéster e Acrílica. Nesse caso, os espectros dos grupos orgânicos apresentados por essas resinas (no caso conhecidas) foram comparados com os grupos orgânicos da resina da pedra sintética – Pedra 1.

A Figura 4.19 apresenta o espectro de FTIR da resina polimérica da pedra sintética - Pedra 1 na região de  $4000-400\text{ cm}^{-1}$ . Procurou-se identificar todas as

bandas características dos grupos orgânicos presentes na estrutura molecular da resina polimérica (Figura 4.19), de acordo com as indicações de SILVERSTEIN *et al.* (2000). Os resultados dessas análises são apresentados na Tabela 4.3.



**Figura 4.19.** FTIR de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  da resina polimérica da pedra sintética - Pedra 1.

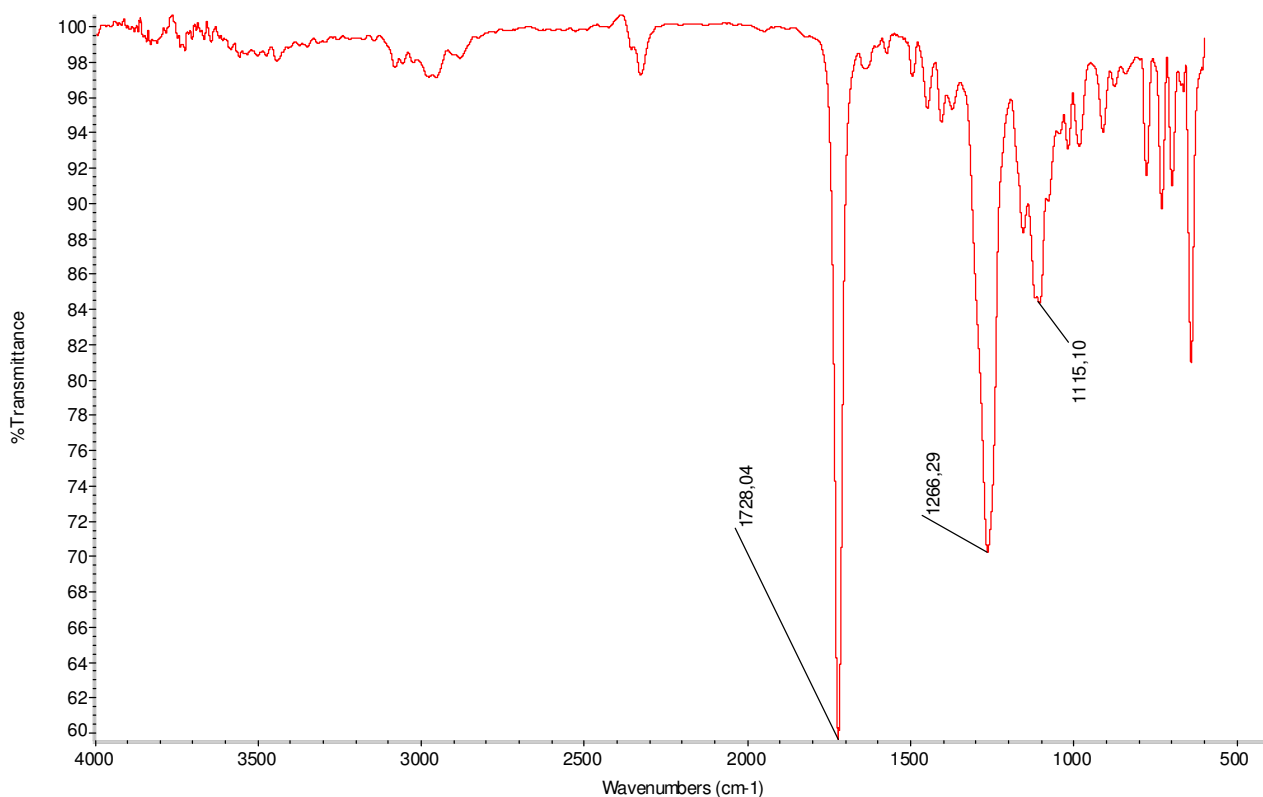
**Tabela 4.3.** Características das bandas de FTIR da resina polimérica da pedra sintética - Pedra 1.

Região de comprimento de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Característica
686	anel aromático meta-substituído
775	anel aromático meta-substituído
1090	Deformação axial do grupo C - O
1625	deformação axial do grupo funcional C=C
1723	deformação axial do grupo carbonila (C=O) de éster

Os resultados dessas análises (Figura 4.19 e Tabela 4.3) indicam que a resina termofixa da Pedra 1 possui em sua estrutura molecular os seguintes grupos funcionais: grupo éster, grupos metileno e metil.

A Figura 4.20 apresenta o espectro de FTIR da resina polimérica de poliéster na região de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ . Identificou-se as bandas características dos grupos orgânicos presentes na estrutura molecular dessa resina (Figura 4.20), de acordo com

as indicações de SILVERSTEIN *et al.* (2000) e os resultados são mostrados na Tabela 4.4.

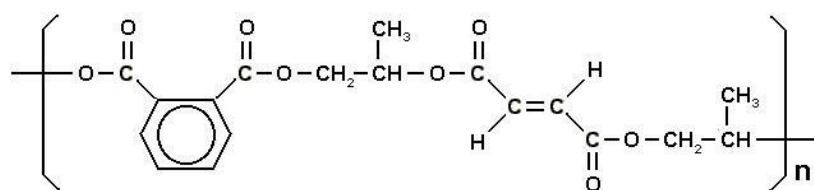


**Figura 4.20.** FTIR de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  da resina polimérica de Poliéster.

**Tabela 4.4.** Características das bandas de FTIR da resina polimérica de poliéster.

Região de comprimento de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Característica
1728	deformação axial do grupo carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ) do éster
1266	vibração do grupo funcional $\text{C}-\text{O}$ de ester aromático
1115	vibração do grupo funcional $\text{C}-\text{O}$ de ester aromático

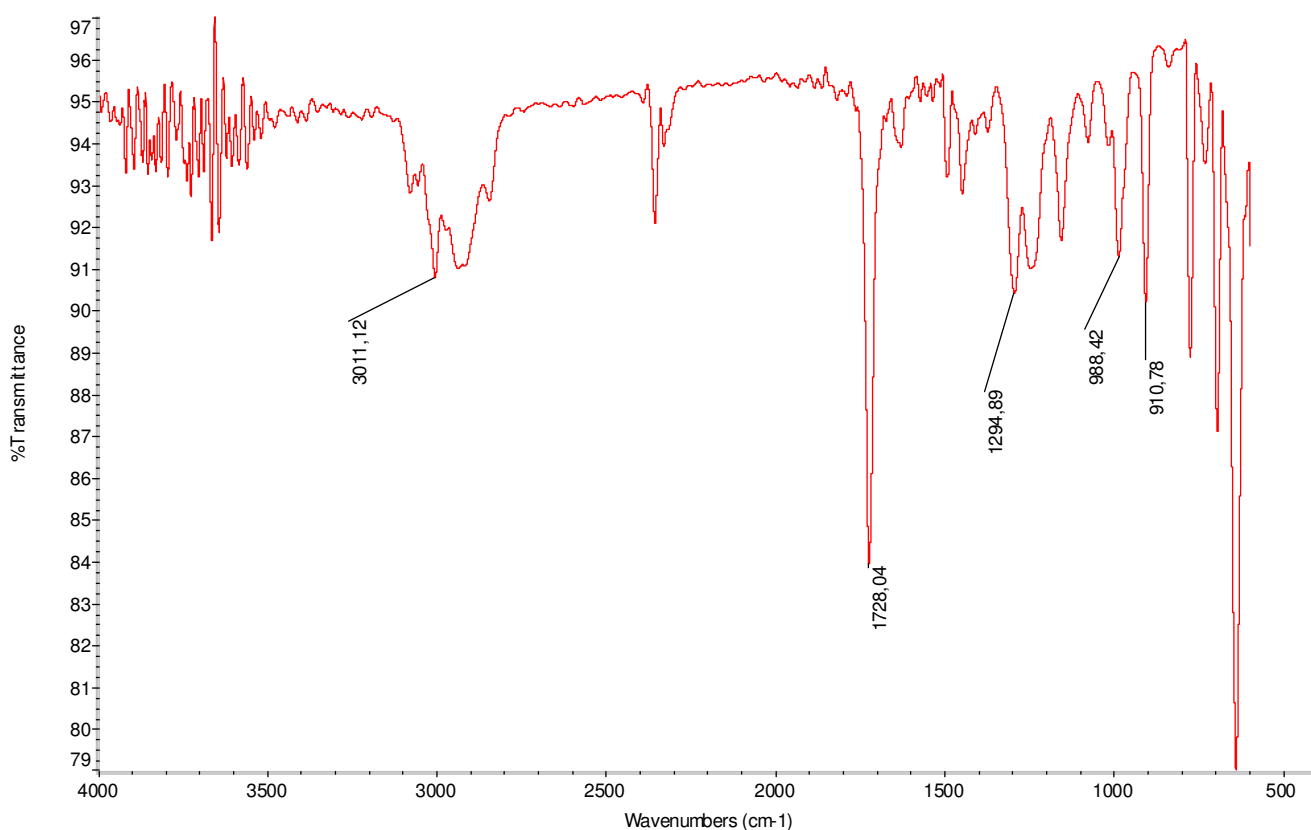
Em uma análise comparativa ficou evidente que os principais grupos funcionais analisados no espectro da Figura 4.20 estão presentes na estrutura molecular da resina poliéster que pode ser identificado na Figura 4.21, onde é representada a estrutura molecular da resina poliéster ortoftálica.



**Figura 4.21.** Resina poliéster ortoftálica. Fonte: Resana S.A. (1992).

Tais resultados (Figura 4.20 e Tabela 4.4) sugerem a existência dos seguintes grupos funcionais na resina de poliéster: grupos metil e metileno, ligação C=C de alceno, grupo éster e éter aromático (anel - O - C).

A Figura 4.22 apresenta o espectro de FTIR da resina polimérica acrílica na região de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$ . Identificaram-se todas as bandas características dos grupos orgânicos presentes na estrutura molecular dessa resina (Figura 4.22), de acordo com as indicações de SILVERSTEIN *et al.* (2000) e os resultados são mostrados na Tabela 4.5.



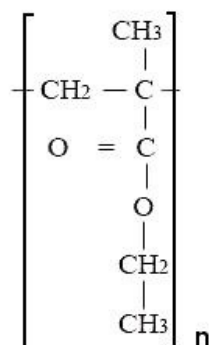
**Figura 4.22.** FTIR de 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  da resina polimérica acrílica.

Os resultados das análises dos grupos orgânicos presentes na estrutura molecular da resina acrílica (Figura 4.22 e Tabela 4.5) sugerem a existência de grupos metil e metileno, grupo éster, ligação C=C de alceno, éter aromático (anel - O - C).

**Tabela 4.5.** Características das bandas de FTIR da resina acrílica.

Região de comprimento de onda (cm <sup>-1</sup> )	Característica
910 - 988	deformação angular fora do plano da ligação RCH = CH <sub>2</sub>
1294	Deformação do grupo funcional C – O de ester
1370	deformação angular simétrica do grupo metil (-CH <sub>3</sub> )
1728	deformação axial do grupo carbonila (C=O) do éster
3011	deformação axial da ligação C-H

Fazendo um comparativo das bandas obtidas no espectro da Figura 4.22 com a unidade monomérica do ácido metacrílico, representado na Figura 4.23, fica confirmado que o espectro analisado refletiu o comportamento característico de uma resina acrílica, em função das características das bandas demonstradas na Tabela 4.5.



**Figura 4.23.** Representação da unidade monomérica do ácido metacrílico.

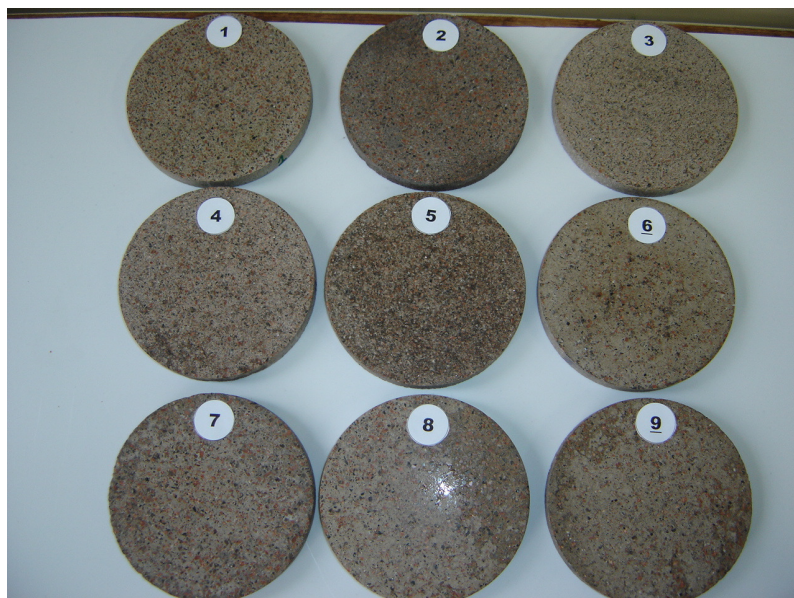
Após as análises e comparações entre os três espectros, resina poliéster, resina acrílica e resina da pedra sintética - Pedra 1, verificou-se algumas similaridades de bandas, o que indica a existência dos mesmos grupos orgânicos nas resinas. Porém, avaliando-se apenas as bandas de maior intensidade, percebe-se pouca semelhança. A banda em torno de 1728 cm<sup>-1</sup> ficou bem evidente em todas as resinas, o que sugere a existência de grupo éster. Outro ponto a ser destacado é a existência de anel aromático substituído também em todas as resinas, pois várias bandas que indicam a presença de anel foram identificadas. Entretanto, pode-se concluir que com apenas os resultados de FTIR não se consegue afirmar se a resina polimérica utilizada para a produção da pedra sintética - Pedra 1 é do tipo poliéster ou

do tipo acrílica, pois as bandas de maior intensidade dessa resina foram identificadas ora no espectro da resina de poliéster, ora na resina acrílica.

### 4.3 COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU

#### 4.3.1 Aparência Visual dos Compósitos

Quanto à qualidade visual, obteve-se uma boa aparência dos compósitos após o processo de polimento, o que elevou ainda mais a semelhança comparada com os granitos naturais (Figura 4.24).



**Figura 4.24.** Aparência visual dos compósitos de resina acrílica com granito Caju.

#### 4.3.2 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão

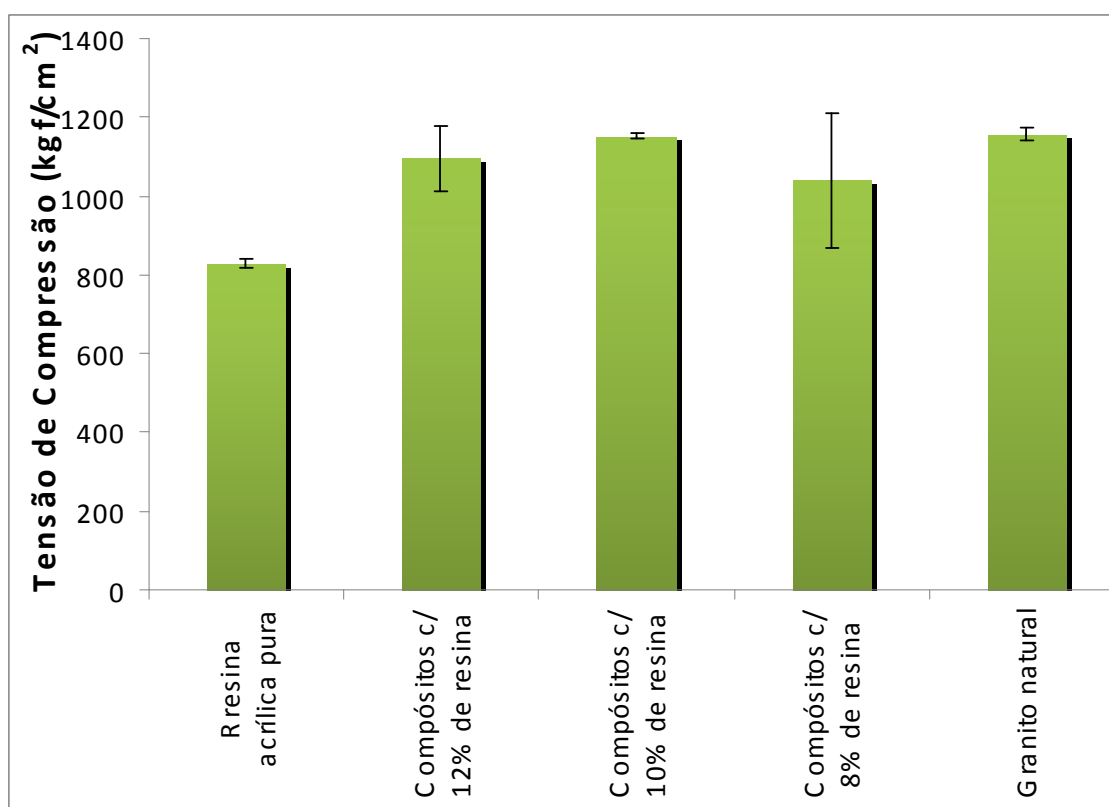
Os resultados obtidos de resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, bem como os resultados relativos ao granito natural e à resina acrílica pura, são apresentados na Tabela 4.6 e Figura 4.25.

A tensão de compressão média dos Compósitos com 12% de resina acrílica foi de 1095 kgf/cm<sup>2</sup>. Estes compósitos foram confeccionadas com 12% (em massa) de resina acrílica e, em média com 8,21% do percentual de massa final de resina no compósito (M<sub>frc</sub>). Comparando-se a resistência à compressão desses compósitos com o granito natural (1158 Kgf/cm<sup>2</sup>) verifica-se que tais compósitos foram, em média, 5,39% menos resistentes, o que pode ser considerado pouco significativo. Esses

resultados sugerem que as partículas do granito Caju ficaram dispostas entre si com poucas imperfeições (porosidade), sendo que as partículas ficaram bem impregnadas pela resina, o que garantiu aos compósitos uma cura eficiente que manteve as partículas unidas. Fica evidente que os poucos defeitos entre as fases acrílica e inorgânica inibiram os defeitos de escorregamentos e/ou continuidade da deformação elástica. Também fica evidente que o granito natural Caju suportou excelentemente os esforços devido as poucas discordâncias e defeitos interfaciais dos cristais.

**Tabela 4.6.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

Compósito	Tensão de compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
R resina acrílica pura	829 (±11,00)
Compósitos com 12% de resina acrílica	1095 (±82,34)
Compósitos com 10% de resina acrílica	1153 (±7,64)
Compósitos com 8% de resina acrílica	1041(±172,14)
Granito natural	1158 (±14,73)



**Figura 4.25.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

Comparando-se a tensão de compressão média dos Compósitos com 10% de resina acrílica com a tensão do granito natural, percebe-se uma redução dessa propriedade em apenas 0,4%. Esses compósitos foram confeccionados com 10% de resina e 7,36% de massa final de resina no compósito (M<sub>frc</sub>). Estes resultados indicam que a quantidade de resina foi suficiente para garantir a umectação das partículas proporcionando ótimo grau de interligação entre as cadeias moleculares elevando o nível de energia de coesão envolta das partículas minerais dificultando sua mobilidade garantindo consistência aos Compósitos.

Outro resultado importante e que vale a pena ser destacado é que nos Compósitos com 10% de resina acrílica foram usadas partículas menores que 0,074 mm, ou seja, estas partículas diminuíram os interstícios vazios, minimizando a porosidade, conseqüentemente diminuindo os escorregamentos entre as fases, elevando a resistência à compressão. As partículas menores que 0,074 mm foram o resultado da reciclagem mecânica no moinho de bolas.

Para os Compósitos com 8% de resina acrílica obteve-se a tensão de compressão média, aproximadamente 10% inferior à tensão do granito natural. Essa perda de propriedade é significativa e justificada pelo fato que estes compósitos foram confeccionadas com apenas 8,0% (em massa) de resina e 5,70% de massa final de resina no compósito (M<sub>frc</sub>). Esses resultados indicam que a quantidade de resina nos Compósitos foi insuficiente para umectar todas as partículas minerais e, conseqüentemente, gerou descontinuidade das reticulações da resina, ou seja, baixo grau de interligação entre as insaturações no compósito, proporcionando partículas soltas que sob o efeito da carga compressiva, desenvolviam o escorregamento entre si.

Analisando a resistência de tensão à compressão da resina acrílica pura (829 Kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>) com os demais compósitos, percebe-se que a resina pura possui resistência inferior, o que demonstra que houve aumento de resistência dos compósitos devido a incorporação da carga mineral, sendo um ganho interessante nesta propriedade para este tipo de material, mostrando que esta reciclagem, carga mineral mais resina polimérica termofixa, formaram um produto onde a reticulação da resina proporcionou a coesão da carga mineral no compósito, ou seja, o meio descontínuo (a carga) gera o efeito da redução da deformação plástica, isto porque age como agente estrutural efetuando a função de absorver os esforços do meio contínuo.

De modo geral, comparando-se os resultados de resistência à compressão dos compósitos desenvolvidos com os dados do fabricante (CAESARSTONE, 2007), que desenvolve pedras sintéticas de granito com tensão de compressão de 2200 Kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup>, obteve-se redução de 47,6% em relação à tensão de compressão do



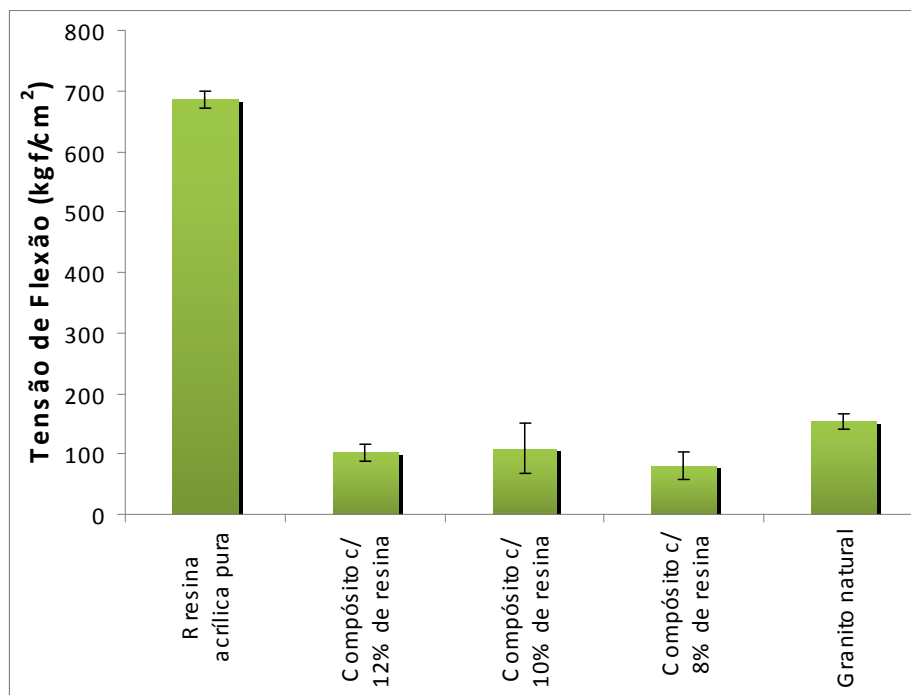
fabricante. Tal comportamento pode estar relacionado com características de automação do processo de fabricação da CAESARSTONE (2007) e a técnica de compressão com vibração a vácuo, a qual reduz os interstícios vazios entre as partículas do mineral, devido à migração da resina pelo efeito vácuo no processamento e, conseqüentemente, proporciona a resina um melhor poder de reticulação.

#### 4.3.3 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão

Os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, bem como os resultados relativos ao granito natural e à resina acrílica pura, são apresentados na Tabela 4.7 e Figura 4.26.

**Tabela 4.7.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

Compósito	Tensão de flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Resina acrílica pura	686 (±13,50)
Compósitos com 12% de resina acrílica	102 (±13,01)
Compósitos com 10% de resina acrílica	109 (±41,07)
Compósitos com 8% de resina acrílica	81 (±22,87)
Granito natural	153 (±13,00)



**Figura 4.26.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

A média das tensões de flexão dos Compósitos desenvolvidos com 12% de resina foi de 102 kgf/cm<sup>2</sup>, nos Compósitos desenvolvidos com 10% de resina foi de 109 Kgf/cm<sup>2</sup> e, nos Compósitos desenvolvidos com 8% de resina foi de 81 kgf/cm<sup>2</sup>. Comparado com o granito natural que apresentou tensão de flexão de 153 kgf/cm<sup>2</sup>, percebeu-se que os Compósitos com 10% de resina acrílica tendo tensão de flexão 28,76% menor que a do granito natural, foi os Compósitos que melhor representaram as condições naturais em relação à tensão de flexão.

Reforçando o que fora comentado em relação tensão de compressão para os Compósitos com 10% de resina acrílica, o bom desempenho está relacionado com o uso na composição de granulometrias inferior a 0,074 mm, granulometrias estas obtidas pelo processo de moagem na qual se usou o moinho de bolas devido à dificuldade e processo desgastante da moagem manual. Este fato possibilitou melhor aglomeração do Compósito diminuindo as imperfeições aliadas à quantidade suficiente de resina que permitiu a reticulação necessária ao Compósito. Outro fator do bom desempenho é que a resina acrílica permitiu, após a cura, o escoamento elástico, ou mobilidade das cadeias moleculares garantindo alta resistência à deformação elástica, como se no Compósito as impureza (considerando o mineral em relação à resina pura) fossem menores, garantindo e absorvendo os esforços externos tornando os Compósitos menos rígidos, ou seja, mais flexíveis, ou com mobilidade molecular. Isto também ficou bem evidente na resina acrílica pura.

Nos Compósitos com 8% de resina acrílica não foram evidentes os fatos anteriores devido a pouca quantidade de resina nos Compósitos, proporcionando baixa umectação do mineral. Nos Compósitos com 12% de resina acrílica a quantidade de resina foi adequada garantindo absorção de energia de flexão mas, consequentemente a variação granulométrica ainda permitiram imperfeições não resistindo aos esforços de flexão próximos ao natural. Fica evidente aqui que as partículas (fase descontínua) impossibilitam a maior deformação elástica, então o compósito sendo um corpo mais rígido imediatamente entrou em regime de deformação plástica.

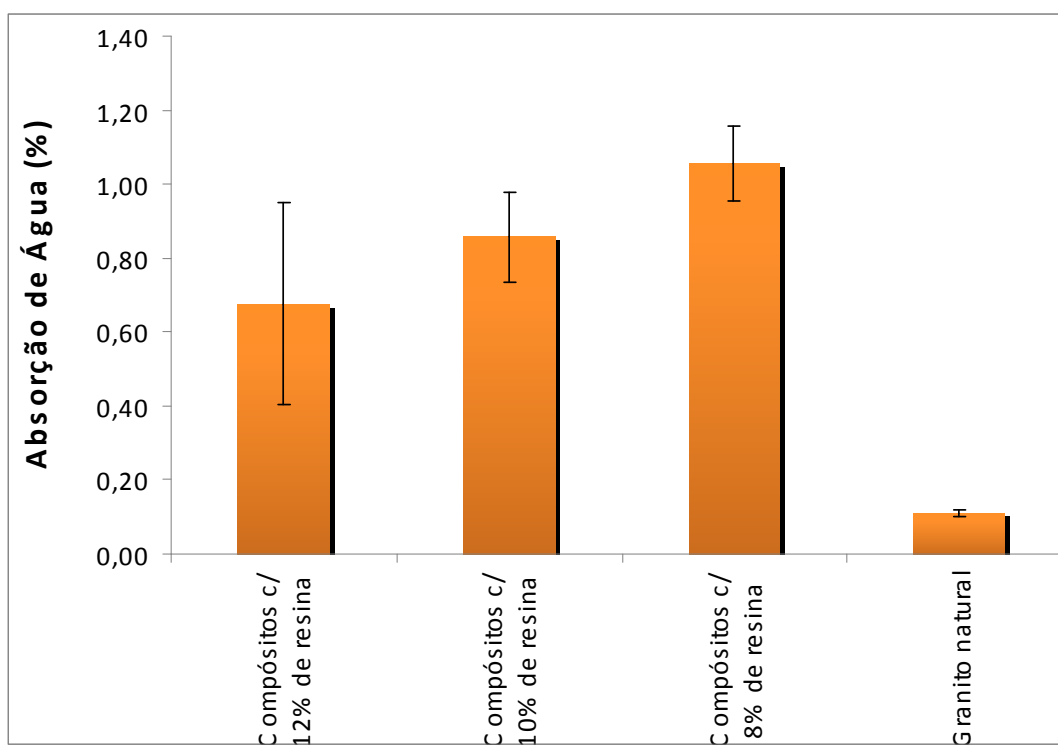
O excelente desempenho da resistência à tensão de flexão da resina acrílica pura, comparada aos Compósitos e ao granito Caju natural, é explicado pela característica da resina de apresentar mobilidade molecular sob efeito de tensão. Quando existe a incorporação do mineral (no caso dos Compósitos), ocorre interrupção das interligações das ligações das cadeias moleculares segundo (CARVALHO 2002), e isto minimiza o efeito de escoamento molecular, consequentemente menor absorção de energia de flexão.

#### 4.3.4 Ensaio Absorção de Água

Os resultados obtidos de absorção de água dos compósitos de resina acrílica com granito Caju são apresentados na Tabela 4.8 e Figura 4.27.

**Tabela 4.8.** Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

Compósitos	Absorção de água (%)
Compósitos com 12% de resina acrílica	0,68 ( $\pm 0,27$ )
Compósitos com 10% de resina acrílica	0,86 ( $\pm 0,12$ )
Compósitos com 8% de resina acrílica	1,06 ( $\pm 0,10$ )
Granito natural	0,11 ( $\pm 0,01$ )



**Figura 4.27.** Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão.

As médias de absorção de água dos Compósitos aumentaram em relação ao decréscimo da porcentagem de resina (12%, 10% e 8%) aplicada na confecção dos Compósitos, conforme pode ser visto na Figura 4.27. Isto mostra que quanto menor foi a umectação dos minerais no processo de mistura com a resina, mais expostas ficaram as áreas superficiais das partículas minerais sem o invólucro da resina,

consequentemente maiores as imperfeições entre as fases e maior a facilidade da penetração da água no interior da estrutura do Compósito.

Outros fatores que explicam as diferenças de absorção da água nos Compósitos podem ter relação com as áreas maiores ou menores dos corpos de provas expostos ao ataque da água durante as fases do ensaio. Significa dizer que haverá possibilidades de maior difusão da água em compósitos com maiores áreas ou maiores volumes dos corpos de provas, sendo possível a variação dos dimensionais durante a obtenção dos corpos de provas.

Notou-se que o grupo de Compósitos com 12% de resina foi o que menos absorveu água, em particular neste grupo encontrou-se corpos de provas que absorveram água em torno de 65% a mais que o granito natural. Esta particularidade é oriunda dos Compósitos que permaneceram com menor tempo sob o efeito de compressão durante o processamento, ou seja, isto pode ter facilitado o efeito de vibração molecular permitindo o melhor grau de interligação das insaturações ( $C=C$ ), gerando o maior grau de cura do polímero (CARVALHO, 2002) que resulta no eficiente processo de reticulação da resina, favorecendo o invólucro quase que perfeito das partículas do mineral com a resina curada, com isto, dificultando a entrada da água, e também devido a maior reticulação menos átomo com elétrons livres para atrair a molécula da água.

Em análise comparativa com o fabricante CaesarStone (EUA), conforme mostra a Tabela 2.3, CAESARSTONE (2007), suas pedras sintéticas tem um percentual de absorção de água de 0,02% onde comparando com o nosso melhor desenvolvimento que foram os Compósito com 12% de resina que apresentaram em média índice de absorção de água de 0,68%. Percebe-se que os Compósitos desenvolvidos apresentaram elevada capacidade de absorção de água devido as imperfeições não eliminadas no processo, no caso, processo sem vibração na etapa de compressão, em alguns casos a dificuldade de umectação do mineral pela pouca quantidade de resina que também influenciou. Somado os fatores anteriores temos também a hipótese de que o processo mecânico de polimento influencia na abertura de poros superficiais, colaborando para a migração de água ao interior do compósito.

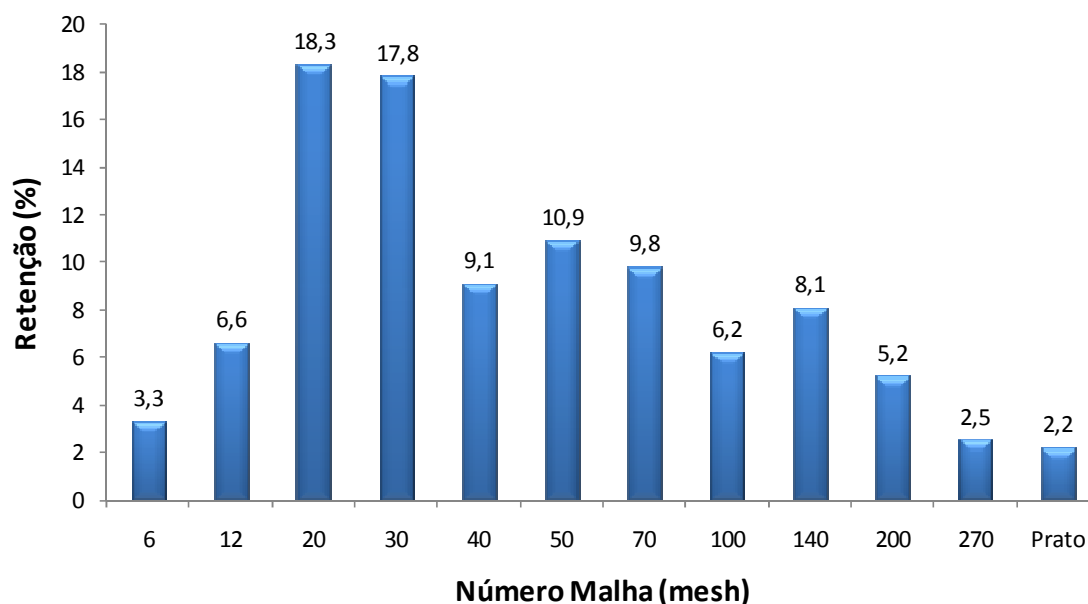
#### 4.4 COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM MÁRMORE BRANCO

##### 4.4.1 Distribuição Granulométrica das partículas de Mármore Branco

A Tabela 4.9 e Figura 4.28 mostram a distribuição granulométrica das partículas do mineral mármore tipo Branco, que resultaram do processo da quebra dos rejeitos (moagem). Distribuição esta empregada na confecção dos compósitos.

**Tabela 4.9.** Distribuição granulométrica das partículas de mármore branco utilizadas nos compósitos com resina acrílica

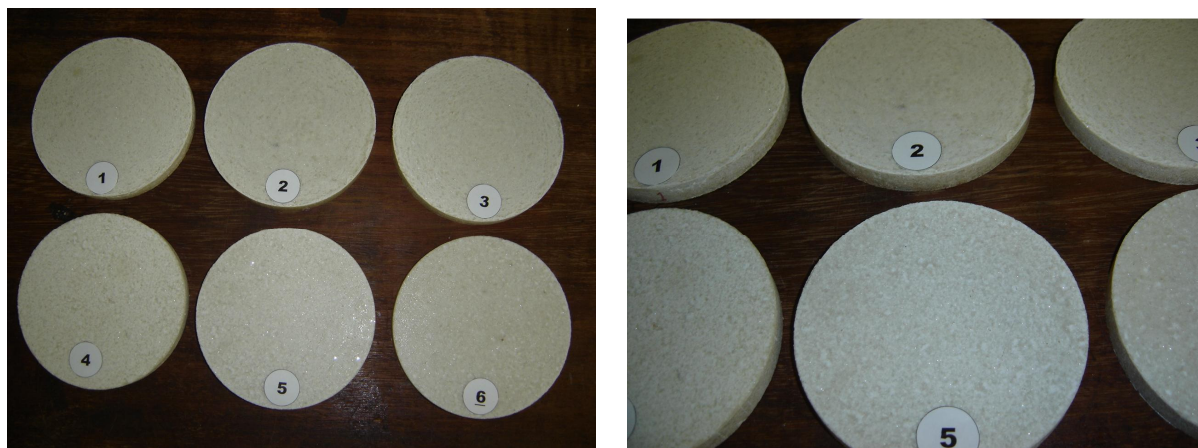
Malha (mm)	Nº malha (mesh)	Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + mármore	Retenção (g)	Retenção (%)
3,360	6	348,00	349,65	1,65	3,3
1,680	12	431,05	434,35	3,30	6,6
0,840	20	380,60	389,75	9,15	18,3
0,590	30	329,15	338,05	8,90	17,8
0,420	40	334,15	338,70	4,55	9,1
0,297	50	310,10	315,55	5,45	10,9
0,210	70	308,80	313,70	4,90	9,8
0,149	100	320,20	323,30	3,10	6,2
0,105	140	308,65	312,70	4,05	8,1
0,074	200	292,80	295,40	2,60	5,2
0,053	270	301,30	302,55	1,25	2,5
	Prato	365,30	366,40	1,10	2,2
<b>Soma</b>				<b>50</b>	<b>100</b>



**Figura 4.28.** Gráfico da distribuição granulométrica das partículas de mármore branco utilizadas nos compósitos com resina acrílica.

#### 4.4.2 Aparência Visual dos Compósitos

Quanto ao aspecto visual, notou-se excelente aparência dos compósitos mesmo sem o polimento, mostrando semelhança destes com as pedras naturais de mármore Branco (Figura 4.29).



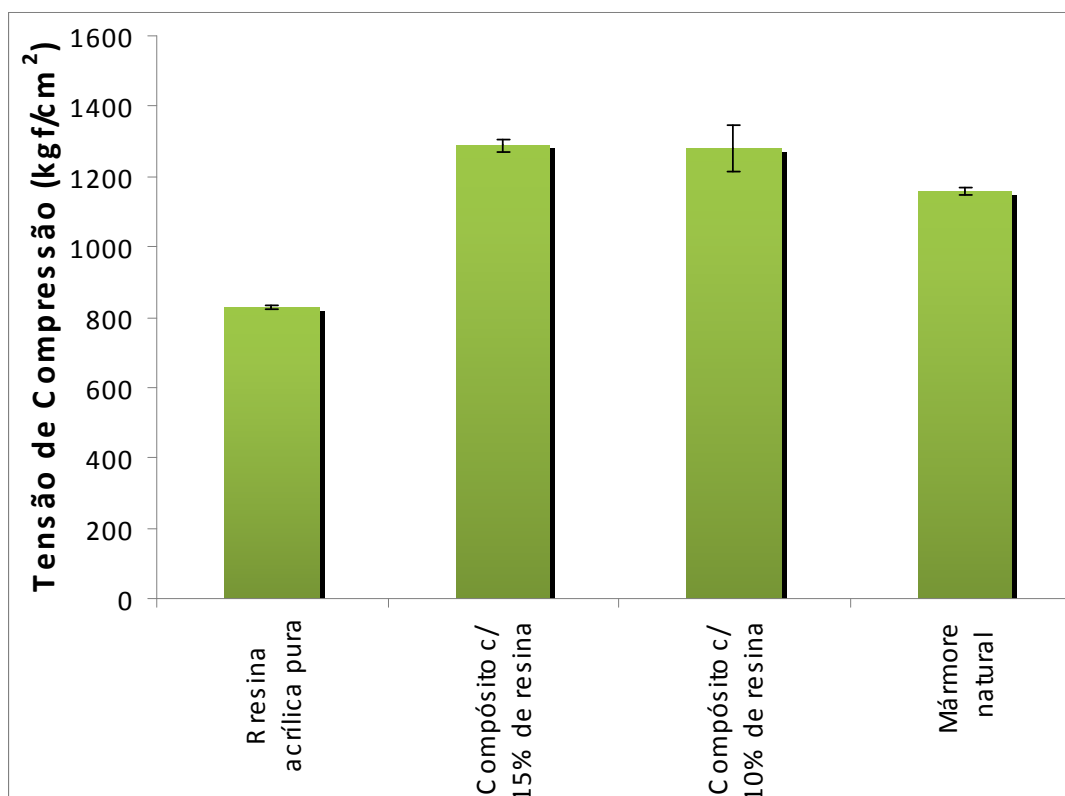
**Figura 4.29.** Aparência visual dos compósitos de resina acrílica com mármore branco.

#### 4.4.3 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão

Os resultados obtidos de resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, bem como os resultados relativos ao mármore natural e à resina acrílica pura, são apresentados na Tabela 4.10 e Figura 4.30.

**Tabela 4.10.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco obtidos por compressão.

Compósito	Tensão de compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Resina acrílica pura	829 ( $\pm 11,00$ )
Compósitos com 15% de resina acrílica	1289 ( $\pm 18,18$ )
Compósitos com 10% de resina acrílica	1281 ( $\pm 66,78$ )
Mármore natural	1158 ( $\pm 9,00$ )



**Figura 4.30.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco obtidos por compressão.

A tensão de compressão média dos Compósitos com 15% de resina, foi de 1289 kgf/cm<sup>2</sup>. Estes compósitos foram confeccionados com 15% de resina acrílica e, em média com 8,93% da porcentagem de massa final de resina no compósito (Mfrc). A tensão de compressão do mármore natural foi de 1158 kgf/cm<sup>2</sup>. Notou-se que os compósitos em média foram 10,16% mais resistentes a esta propriedade, onde se pode dizer que esta variação é significativa comparada à propriedade de compressão do mármore natural. Isto significa que as partículas do mármore reciclado ficaram dispostas entre si com perfeita acomodação eliminando as porosidades.

Pode-se considerar o mesmo comentário para os compósitos com 10% de resina onde a tensão média de compressão foi de 1281 kgf/cm<sup>2</sup>, tensão esta 9,6% maior que a do mármore natural. Estas pedras foram confeccionadas com 10% de resina acrílica e em média com 7,53% da porcentagem de massa final de resina no compósito (Mfrc).

Para ambos o grupo de compósitos pode-se constatar que o processo da etapa de reticulação das cadeias moleculares da resina acrílica aconteceu de modo eficiente garantindo alto grau de interligação das cadeias molecular, dificultando o escorregamento da disposição das partículas recicladas de mármore quando

submetidas aos esforços de compressão. De contrapartida o mármore natural teve maior facilidade de mobilidade dos planos cristalinos quando submetidas aos esforços de compressão, fato este que pode estar relacionado com maior número de imperfeições entre suas partículas (ou planos cristalinos) comparadas aos compósitos, que apresentaram pelo comportamento de alta resistência não ter imperfeições (ou poucas) e, alta energia de atração entre as cadeias moleculares da resina acrílica garantindo aos compósitos características de compacto, rígido e coeso.

#### 4.4.4 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão

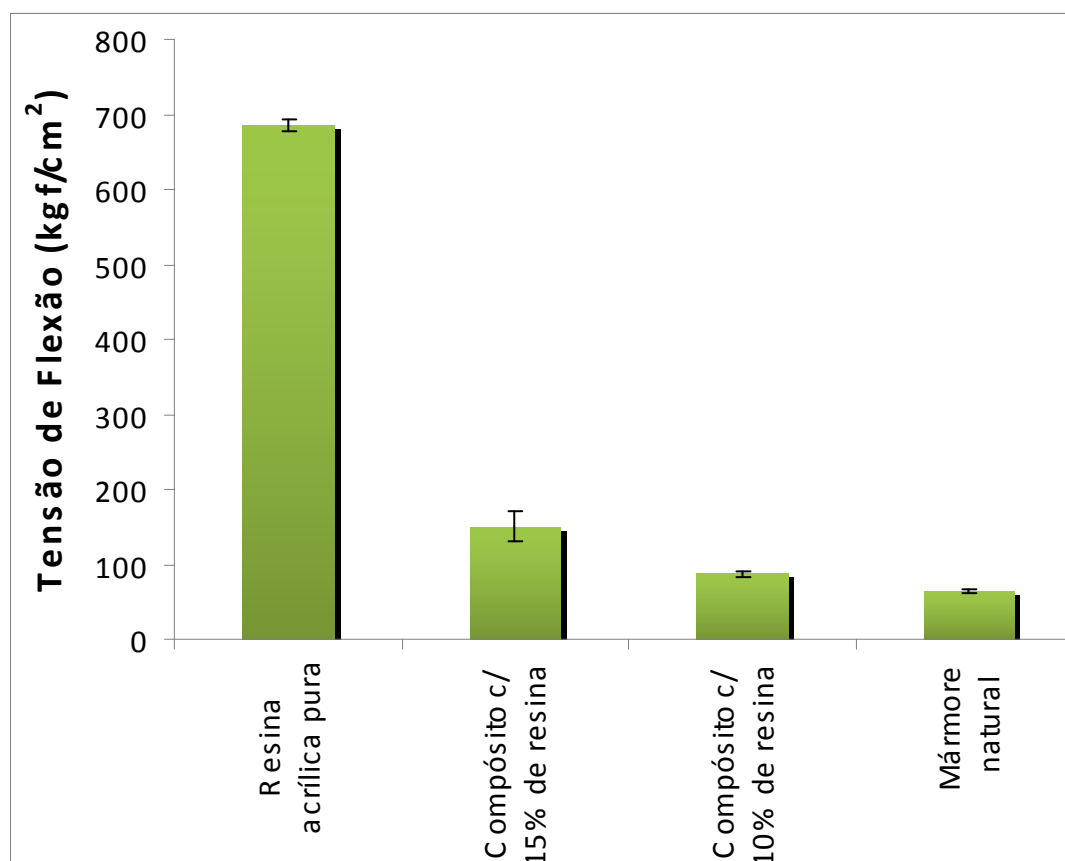
Os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, bem como os resultados relativos ao mármore natural e à resina acrílica pura, são apresentados na Tabela 4.11 e Figura 4.31.

**Tabela 4.11.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão.

Compósito	Tensão de flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Resina acrílica pura	685 (±8,50)
Compósito com 15% de resina	150 (±19,14)
Compósito com 10% de resina	87 (±5,00)
Mármore natural	64 (±3,61)

A média das tensões de flexão dos Compósitos desenvolvidos com 15% de resina acrílica foi de 150 kgf/cm<sup>2</sup>, nos Compósitos desenvolvidos com 10% de resina acrílica foi de 87 kgf/cm<sup>2</sup>. Comparado com o mármore natural que apresentou tensão de flexão de 64 kgf/cm<sup>2</sup>, o grupo dos compósitos com 15% de resina apresentou uma resistência de 134% maior que o mármore natural e os Compósitos com 10% de resina um acréscimo de 35% nesta propriedade.





**Figura 4.31.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão.

Percebeu-se um aumento significativo da propriedade mecânica de resistência à flexão nos compósitos, comparado ao mármore natural, devido ao que se pode deduzir que o grau de interligações moleculares aconteceu de forma eficiente, bem como a resina acrílica apresentou a condição de absorção de energia no campo elástico, dando aos compósitos certa consistência de comportamento dúctil, no início da deformação por flexão, fato este que proporcionou a excelente propriedade.

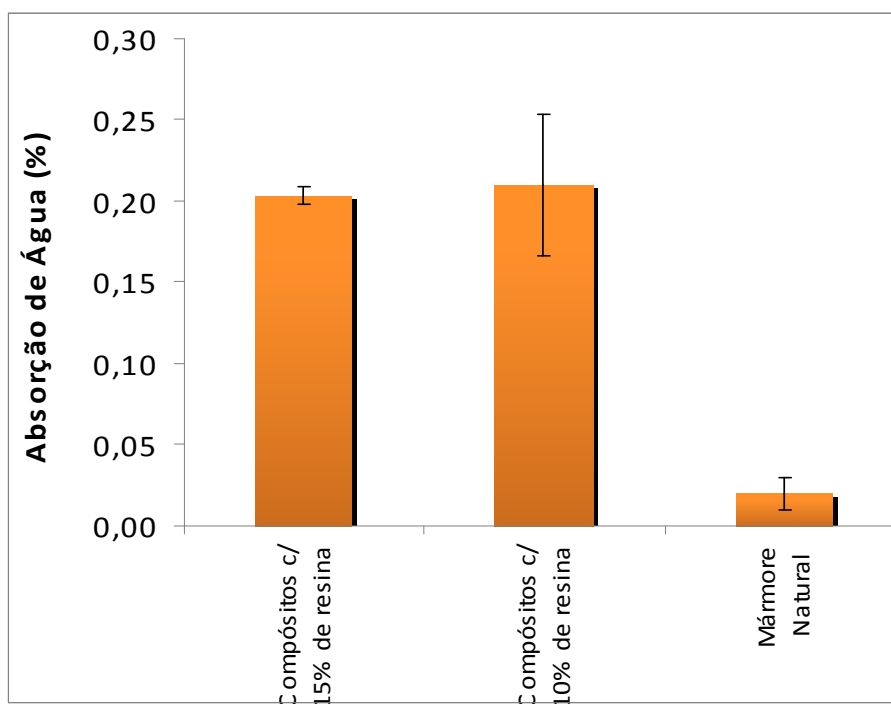
Percebeu-se um decréscimo da propriedade nos Compósitos com 10% de resina, em torno de 42% menor que os Compósitos com 15% de resina, onde se pode justificar que a quantidade de resina que foi menor na confecção proporcionou consequentemente menor número de ligações moleculares diminuindo a concentração de energia de aglomeração do compósito, resistindo menos aos esforços de flexão.

#### 4.4.5 Ensaio Absorção de Água

Os resultados obtidos de absorção de água dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco são apresentados na Tabela 4.12 e Figura 4.32.

**Tabela 4.12.** Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão.

Compósitos	Absorção de água (%)
Compósitos com 15% de resina	0,21( $\pm 0,01$ )
Compósitos com 10% de resina	0,20( $\pm 0,04$ )
Mármore natural	0,02( $\pm 0,01$ )



**Figura 4.32.** Absorção de água dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco obtidos por compressão.

Percebeu-se que os compósitos mantiveram um padrão de absorção de água que ficou em torno de 0,21%. Comparado ao mármore natural que absorveu 0,02% de água, os compósitos tiveram capacidade de absorção de água em torno de 10,5 vezes maior que o mármore natural,

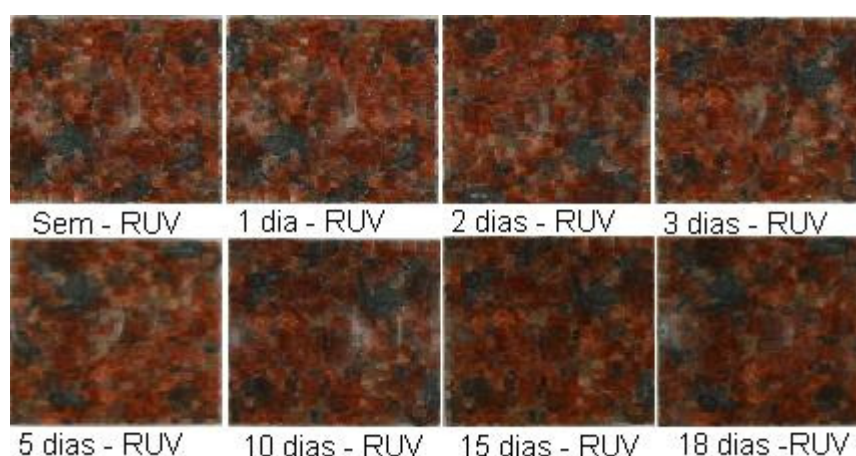
O que pode explicar a grande diferença de absorção da água nos Compósitos é a relação com as áreas maiores ou menores dos corpos de provas expostos ao ataque da água durante as fases do ensaio. Significa dizer que haverá possibilidades de maior difusão da água em compósitos com maiores áreas ou maiores volumes dos corpos de provas, sendo possível a variação dos dimensionais durante a obtenção dos corpos de provas, sendo que as tensões de compressão e flexão foram propriedades maiores que as do mármore natural, isto pode significar baixo índice de imperfeições,

como porosidades, na qual poderiam justificar maior absorção de água. Todavia não podemos descartar a possibilidade da eficiente reticulação da resina acrílica, mesmo assim, permitir regiões do compósito desprovidas do invólucro uniforme da partícula com a resina, possibilitando a penetração da água para o interior do compósito. Também leva-se em conta que a distribuição granulométrica mais uniforme dos rejeitos de mármore Branco (Figura 4.28) utilizadas nos compósitos ainda deve ter porosidade, porém com menor intensidade, ou seja, se fossemos comparar com os compósitos de granito que absorveram água em média 4,3 vezes mais na proporção de 10% de resina que os compósitos de mármore Branco.

#### 4.5 ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DOS COMPÓSITOS DE RESINA ACRÍLICA COM GRANITO CAJU E MÁRMORE BRANCO ATRAVÉS DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA

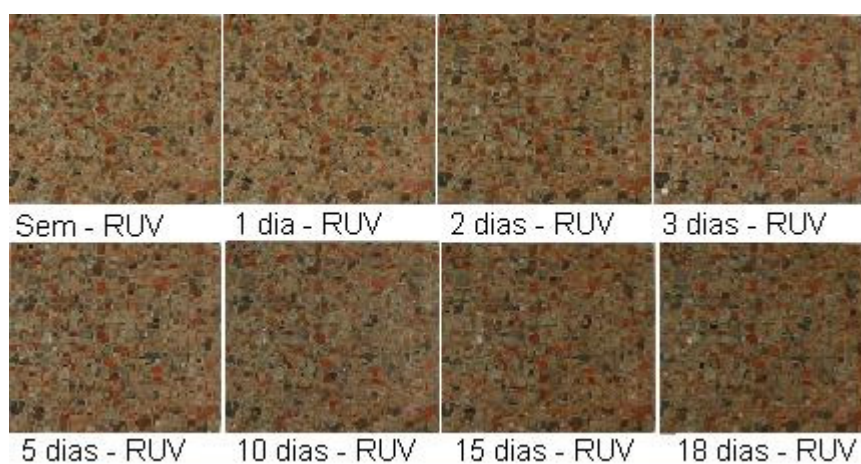
##### 4.5.1 Aparência Visual dos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju

Foram observadas alterações pouco significativas quanto à cor e à textura na superfície dos corpos de prova de compressão e flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju e granito natural, ambos condicionados em câmara de envelhecimento acelerado, após os 18 dias de degradação à radiação UV. Através da Figura 4.33 percebe-se uma leve alteração no tom marrom original do granito natural a partir do décimo dia de radiação UV, com tendência a ficar mais escuro até o décimo oitavo dia de degradação na radiação.



**Figura 4.33.** Superfície do CP de compressão de granito natural Caju durante a degradação em radiação UV.

Esta variação da tonalidade da cor a partir do décimo dia pode estar relacionada com a mudança da textura do corpo de prova devido à micro fissuras superficiais no granito natural, alterando a reflexão da luz e descaracterizando o brilho. Conseqüentemente, o corpo de prova apresentou tonalidade mais escura. Na Figura 4.34, é representado o corpo de prova de compressão do Compósito-1 com granito que foi produzido com 12% de resina acrílica e sem estabilizantes e absorvedores de ultravioleta. Ficaram evidentes mudanças no tom da coloração marrom com tendência ao escurecimento a partir do terceiro dia de radiação ultravioleta com intensidades maiores depois do décimo dia de radiação.



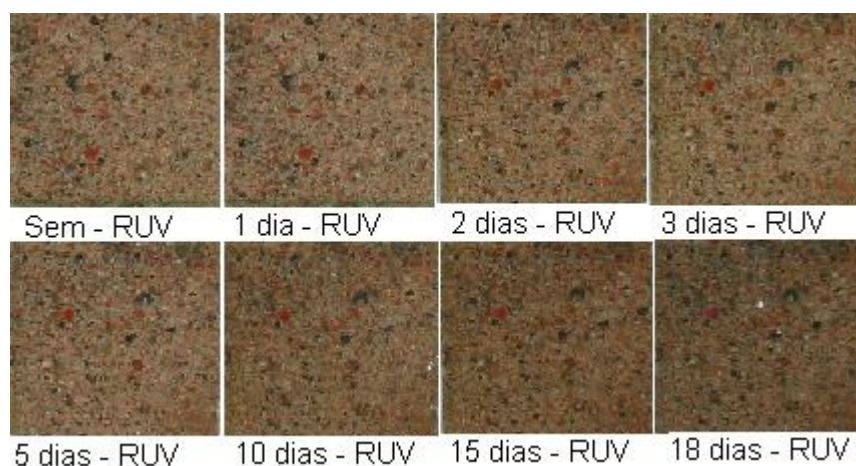
**Figura 4.34.** Superfície do CP de compressão do Compósito-1 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.

Comparativamente com o corpo de provas de compressão do Compósito 3, Figura 4.35, que foi desenvolvido nas mesmas condições do Compósito-1, porem com 2% em peso do aditivo estabilizante e 3% do aditivo absorvedor de ultravioleta, ficou evidente mudanças na tonalidade da cor marrom, com maior intensidade, a partir do décimo quinto dia.

A mudança da tonalidade da cor marrom para ambos os corpos de provas dos Compósitos 1 e 2 (no caso omitimos as fotos do Compósito-2 devido a similaridade com o Compósito-3), esta relacionada com degradação fotooxidativa superficial do polímero acrílico, que conseqüentemente absorveu através de grupos específicos radiação na faixa entre 100nm a 400nm, gerando a cisão molecular devido a excitação eletrônica.

Pode-se dizer que resina acrílica, em função da sua estrutura química como grupos: éster e alcenos, etc, demonstrou sensibilidade espectral a radiação ultravioleta

na faixa de 295 à 345nm, como é o caso do policarbonato que apresenta o grupo ester na sua estrutura e tem sensibilidade espectral a 345nm (AGNELLI, 1996).

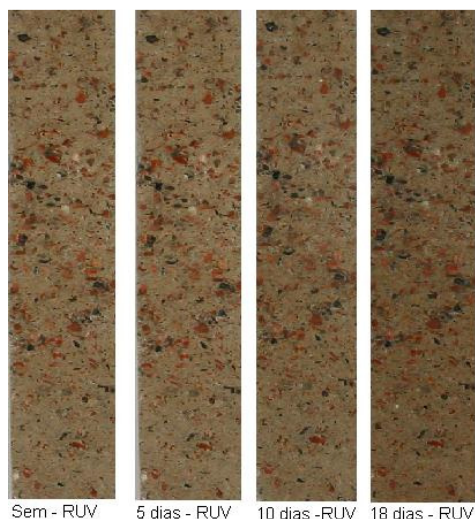


**Figura 4.35.** Superfície do CP de compressão do Compósito-3 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.

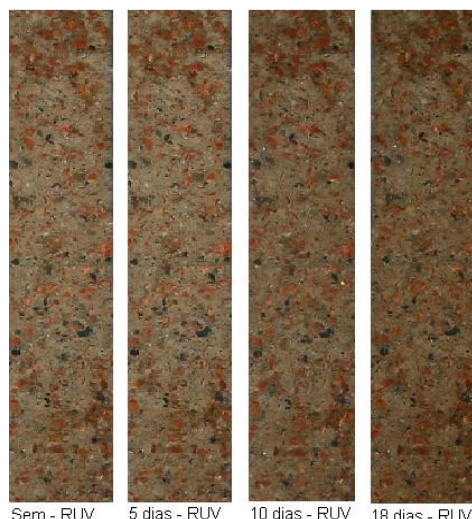
De modo geral as características superficiais para todos os corpos de provas (compressão ou flexão) dos compósitos apresentavam as texturas e tonalidades similares, ou seja, os corpos de provas não aditivados com estabilizantes e absorvedores de ultravioleta demonstravam variações a partir do terceiro dia de radiação e os corpos de provas aditivados aparentavam mudanças a partir do décimo dia. Significa dizer que a estabilização mínima contra RUV que foi aplicada, compósitos 2 e 4, demonstraram proteger os compósitos contra a degradação por radiação UV.

Especificando melhor o que foi comentado acima, as Figuras 4.36 e 4.37 mostram os corpos de provas de flexão dos compósitos 6 e 9 obtido com 10%, 8% de resina acrílica e com maior % de estabilizante e absorvedor de ultravioleta, conforme mostra a Tabela 3.2.





**Figura 4.36.** Superfície do CP de flexão do Compósito-6 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.

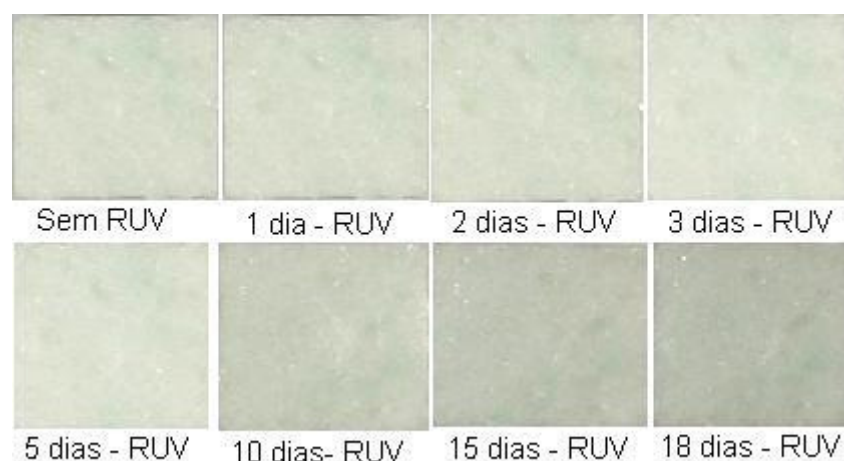


**Figura 4.37.** Superfície do CP de flexão do Compósito-9 (resina acrílica com granito) durante a degradação em radiação UV.

#### 4.5.2 Aparência Visual dos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco

Foram observadas alterações pouco significativas quanto à cor e à textura na superfície dos corpos de prova de compressão e flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco e mármore natural, ambos condicionados em câmara de envelhecimento acelerado, após os 18 dias de degradação à radiação UV. Através da Figura 4.38 percebeu-se uma leve alteração no tom original do mármore Branco a partir do décimo dia de radiação UV. Entretanto, ficou mais evidente o escurecimento no décimo oitavo dia de radiação UV.

Os corpos de prova dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco ficaram com um tom mais amarelado em relação ao mármore natural. Acredita-se que tal comportamento esteja relacionado ao fato de que tais corpos de prova não receberam polimento antes de serem colocados na câmara de envelhecimento para a degradação à radiação UV. O polimento foi evitado para não retirar a película superficial de polímero aditivada do compósito, podendo ser esta a base de proteção da radiação UV.



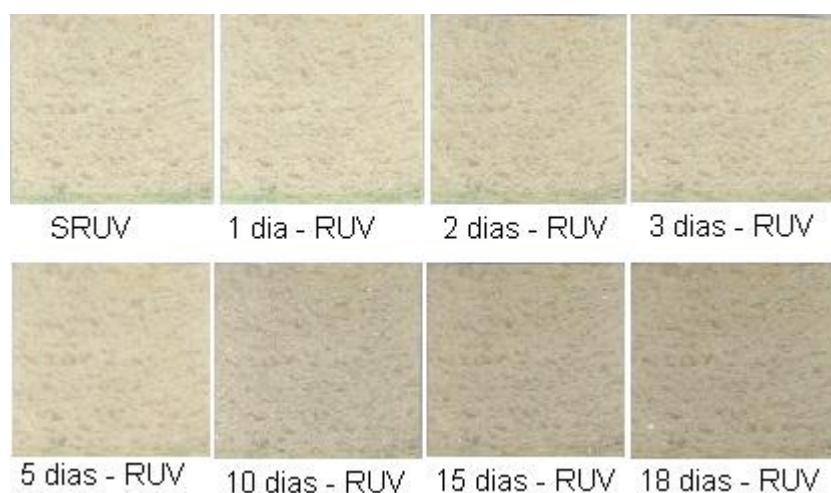
**Figura 4.38.** Superfície do CP de compressão de mármore natural durante a degradação em radiação UV.

De modo geral, os corpos de provas dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco (com e sem aditivos estabilizantes e absorvedores de UV) apresentaram comportamentos similares em relação à tonalidade e textura, como pode ser observado nas Figuras 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42.

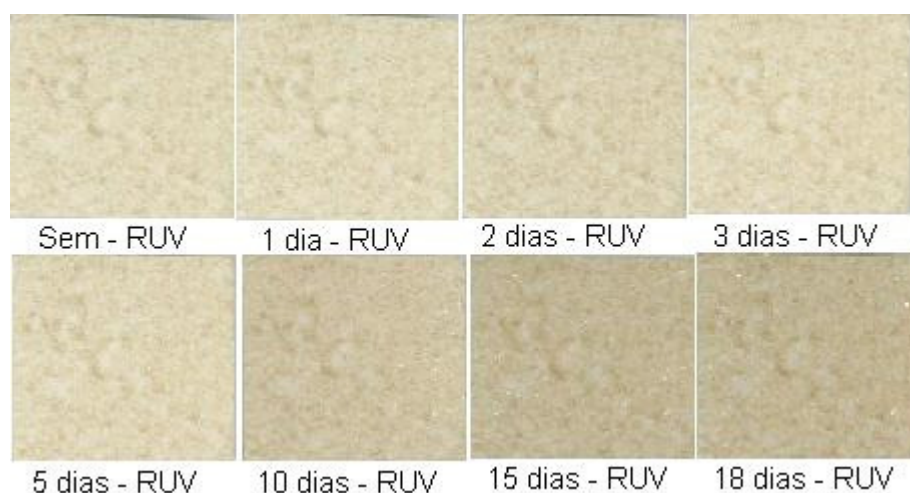
Foram percebidas pequenas variações na tonalidade da cor a partir do décimo dia de degradação à radiação UV, aumentando a evidência da tonalidade a partir do décimo quinto dia. Além disso, foi notado que a textura da superfície ficou mais rugosa, apresentando pequenas fissuras. Esses resultados sugerem que houve a absorção da radiação ultravioleta pelos grupos funcionais constituintes dos compósitos, podendo ser esses grupos da resina polimérica ou do próprio mineral.



**Figura 4.39.** Superfície do CP de compressão do Compósito-1 (resina acrílica com mármore Branco e sem estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV.



**Figura 4.40.** Superfície do CP de compressão do Compósito-3 (resina acrílica com mármore Branco e com estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV.



**Figura 4.41.** Superfície do CP de compressão do Compósito-4 (resina acrílica com mármore Branco e sem estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV.





**Figura 4.42.** Superfície do CP de compressão do Compósito-6 (resina acrílica com mármore Branco e com estabilizantes e absorvedores de UV) durante a degradação em radiação UV.

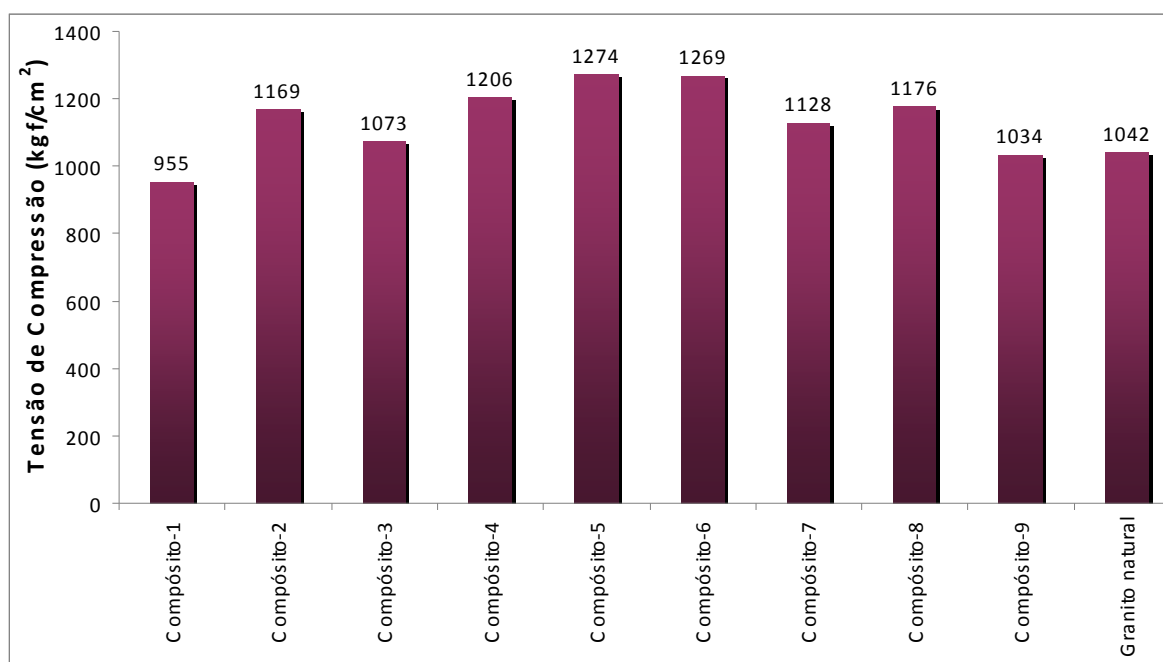
#### 4.5.3 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão nos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju após a Degradação em Radiação UV

Os resultados obtidos de resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, após a degradação em radiação UV, bem como os resultados relativos ao granito natural, são apresentados na Tabela 4.13 e Figura 4.43.

A tensão de compressão média dos Compósitos, após a degradação em radiação UV foi de 1143 kgf/cm<sup>2</sup>. Esta resistência foi aproximadamente 9,0 % maior que a resistência à compressão do granito natural (1042 kgf/cm<sup>2</sup>). Através deste comparativo não temos base para uma análise técnica mais apurada. Na seqüência faz-se a análise entre as resistências antes e após a degradação por radiação UV.

**Tabela 4.13.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão, após a Degradação em Radiação UV

Compósito	Força máxima (kgf)	Área do CP (cm <sup>2</sup> )	Tensão de compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Compósito-1	15310	16,02	955
Compósito-2	19350	16,55	1169
Compósito-3	16300	15,18	1073
Compósito-4	17350	14,38	1206
Compósito-5	19075	14,97	1274
Compósito-6	19440	15,31	1269
Compósito-7	17300	15,33	1128
Compósito-8	19130	16,26	1176
Compósito-9	15410	14,90	1034
Granito natural	18310	15,57	1042



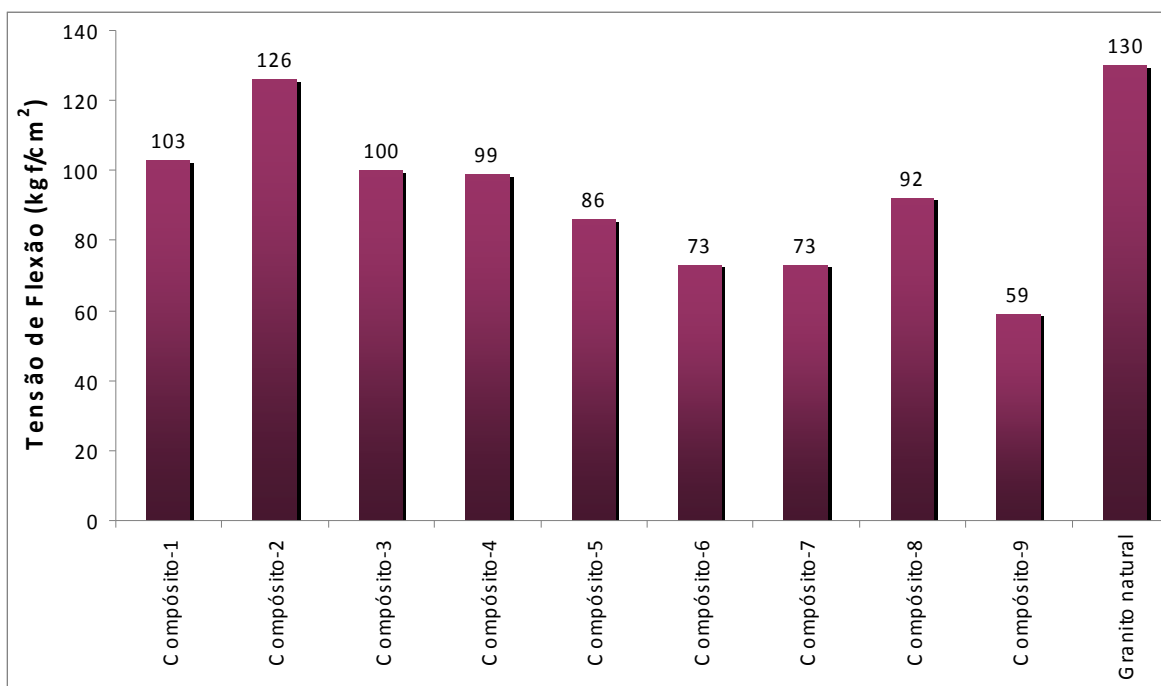
**Figura 4.43.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju obtidos por compressão após a Degradação em Radiação UV

#### 4.5.4 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão nos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju após a Degradação em Radiação UV

Os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, bem como os resultados relativos ao granito natural, são apresentados na Tabela 4.14 e Figura 4.44.

**Tabela 4.14.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju após a Degradação em Radiação UV.

Compósito	Força máxima (kgf)	Tensão de flexão (kgf/cm²)
Compósito-1	50,70	103
Compósito-2	80,00	126
Compósito-3	67,00	100
Compósito-4	58,00	99
Compósito-5	54,00	86
Compósito-6	39,00	73
Compósito-7	36,00	73
Compósito-8	55,00	92
Compósito-9	36,00	59
Granito natural	119,00	130



**Figura 4.44.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju, após a Degradação em Radiação UV

A tensão de flexão média dos Compósitos, após a degradação em radiação UV foi de 90 kgf/cm<sup>2</sup>. Esta resistência foi 30% menor que a resistência à flexão do granito natural (130 kgf/cm<sup>2</sup>). Através deste comparativo não temos base para uma análise técnica mais apurada. Na sequência faz-se a análise entre as resistências antes e após a degradação por radiação UV.

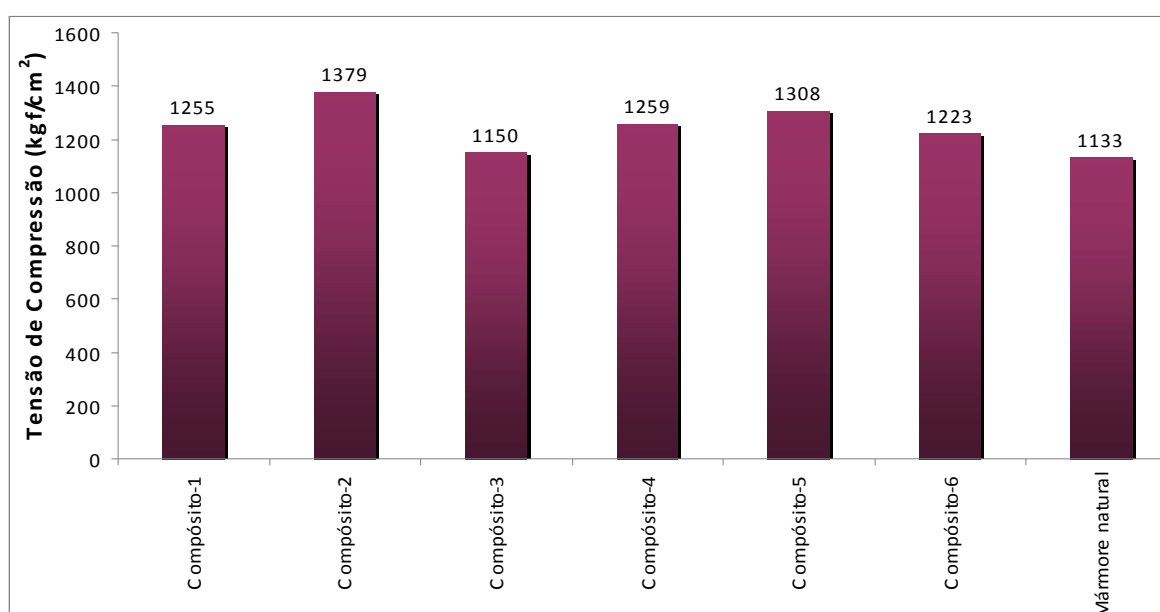
#### 4.5.5 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão nos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco após a Degradação em Radiação UV

Os resultados obtidos de resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, após a degradação em radiação UV, bem como os resultados relativos ao mármore natural, são apresentados na Tabela 4.15 e Figura 4.45.

A tensão de compressão média dos Compósitos, após a degradação em radiação UV foi de 1262 kgf/cm<sup>2</sup>. Esta resistência foi 10% maior que a resistência à compressão do mármore natural (1133 kgf/cm<sup>2</sup>). Através deste comparativo não temos base para uma análise técnica mais apurada. Na sequência faz-se a análise entre as resistências antes e após a degradação por radiação UV.

**Tabela 4.15.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco após a Degradação em Radiação UV.

Compósito	Força máxima (kgf)	Área do CP (cm <sup>2</sup> )	Tensão de compressão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Compósito-1	19500	15,53	1255
Compósito-2	19525	14,15	1379
Compósito-3	19480	16,93	1150
Compósito-4	19610	15,57	1259
Compósito-5	19450	14,86	1308
Compósito-6	18150	14,84	1223
Mármore natural	19030	16,79	1133



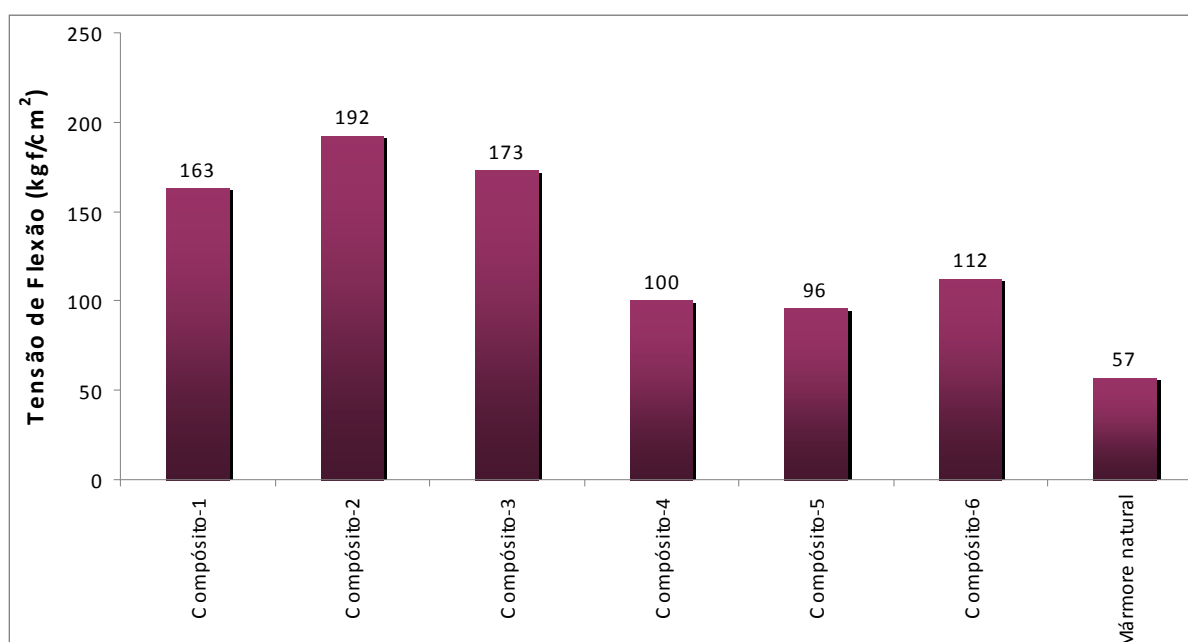
**Figura 4.45.** Resistência à compressão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, após a Degradação em Radiação UV

#### 4.5.6 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão nos Compósitos de Resina Acrílica com Mármore Branco após a Degradação em Radiação UV

Os resultados obtidos de resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore Branco, bem como os resultados relativos ao mármore natural após a degradação em Radiação UV, são apresentados na Tabela 4.16 e Figura 4.46.

**Tabela 4.16.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco após Degradação em Radiação UV

Compósito	Força máxima (kgf)	Tensão de flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )
Compósito-1	87,00	163
Compósito-2	95,00	192
Compósito-3	92,30	173
Compósito-4	46,80	100
Compósito-5	46,80	96
Compósito-6	49,40	112
Mármore natural	66,00	57



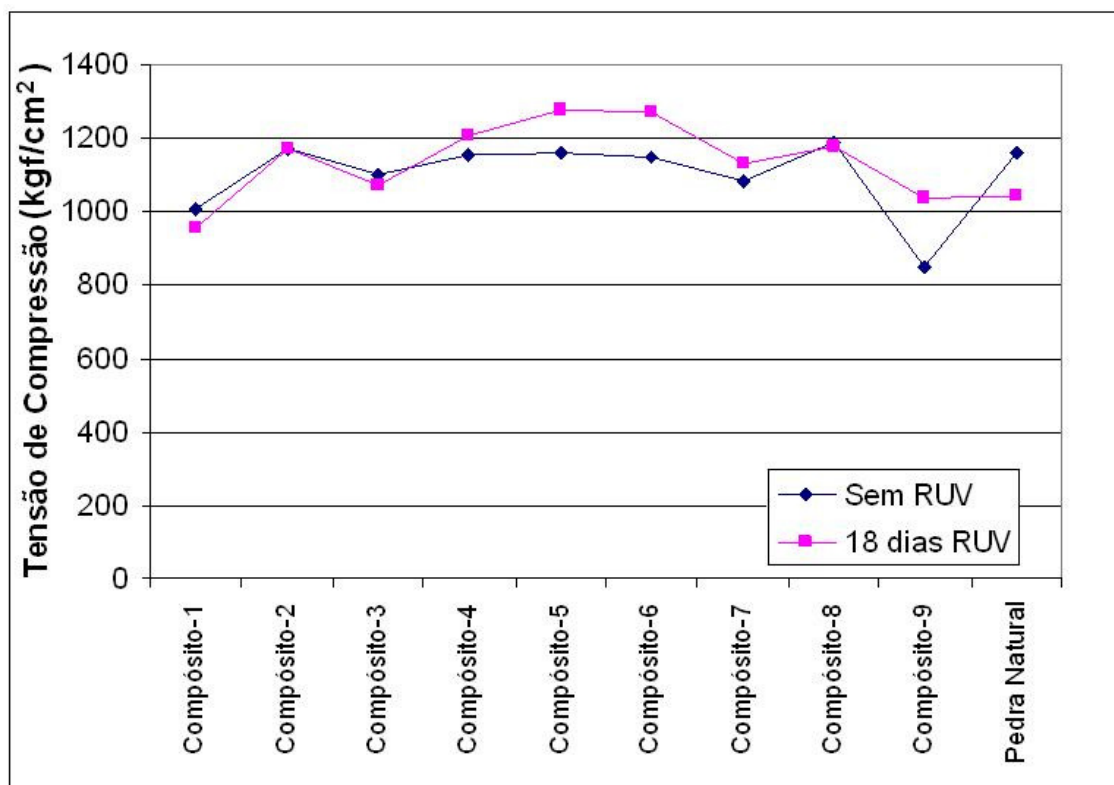
**Figura 4.46.** Resistência à flexão dos compósitos de resina acrílica com mármore branco após Degradação em Radiação UV

A tensão de flexão média dos Compósitos, após a degradação em radiação UV foi de 176 kgf/cm<sup>2</sup>. Esta resistência foi 59% maior que a resistência à flexão do mármore natural (57 kgf/cm<sup>2</sup>). Através deste comparativo não temos base para uma análise técnica mais apurada. Na sequência faz-se a análise entre as resistências antes e após a degradação por radiação UV

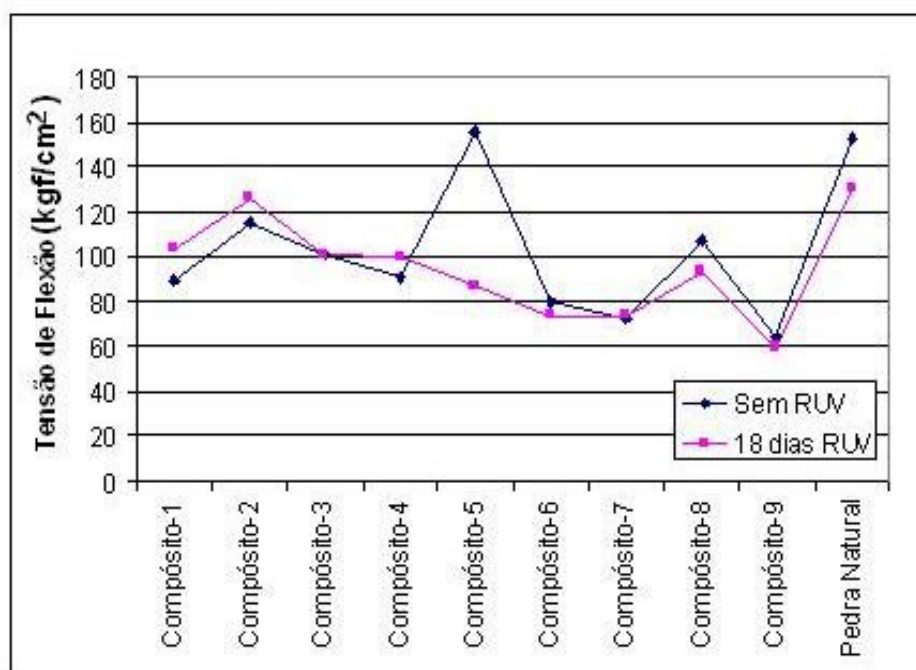
#### 4.5.7 Análises do Estudo da Degradação em Radiação UV dos Compósitos de Resina Acrílica com Granito Caju e Mármore Branco

Os resultados comparativos obtidos de resistência à compressão e à flexão dos compósitos de resina acrílica com granito Caju e com mármore Branco, bem

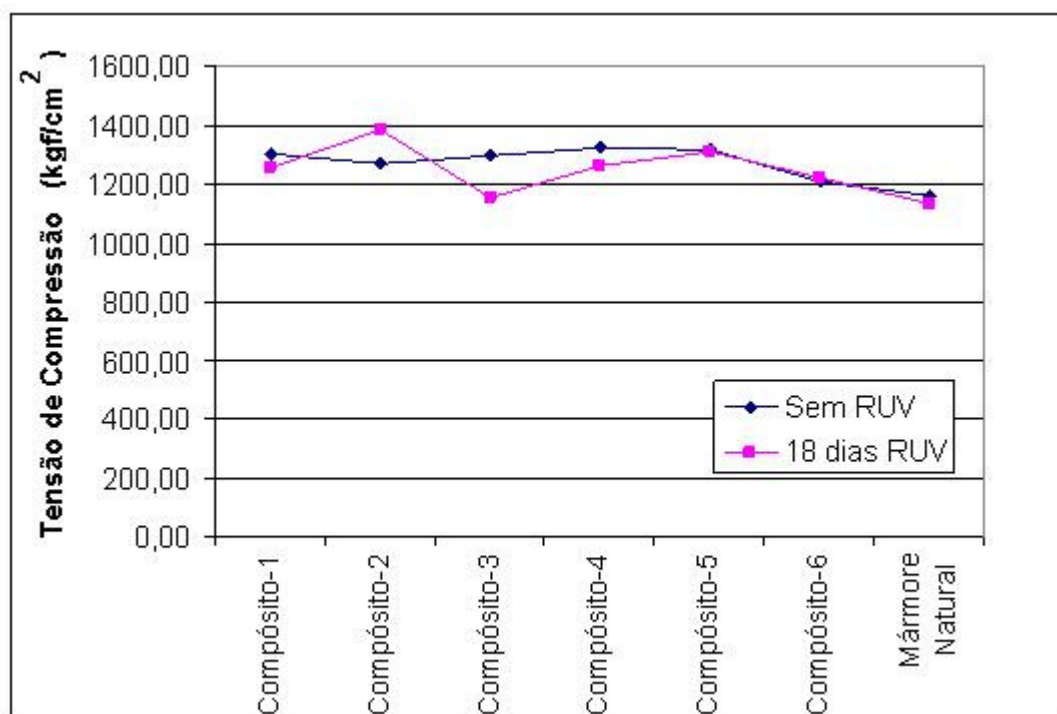
como os resultados relativos ao granito e mármore natural, após a Degradação em Radiação UV, são apresentados nas Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50.



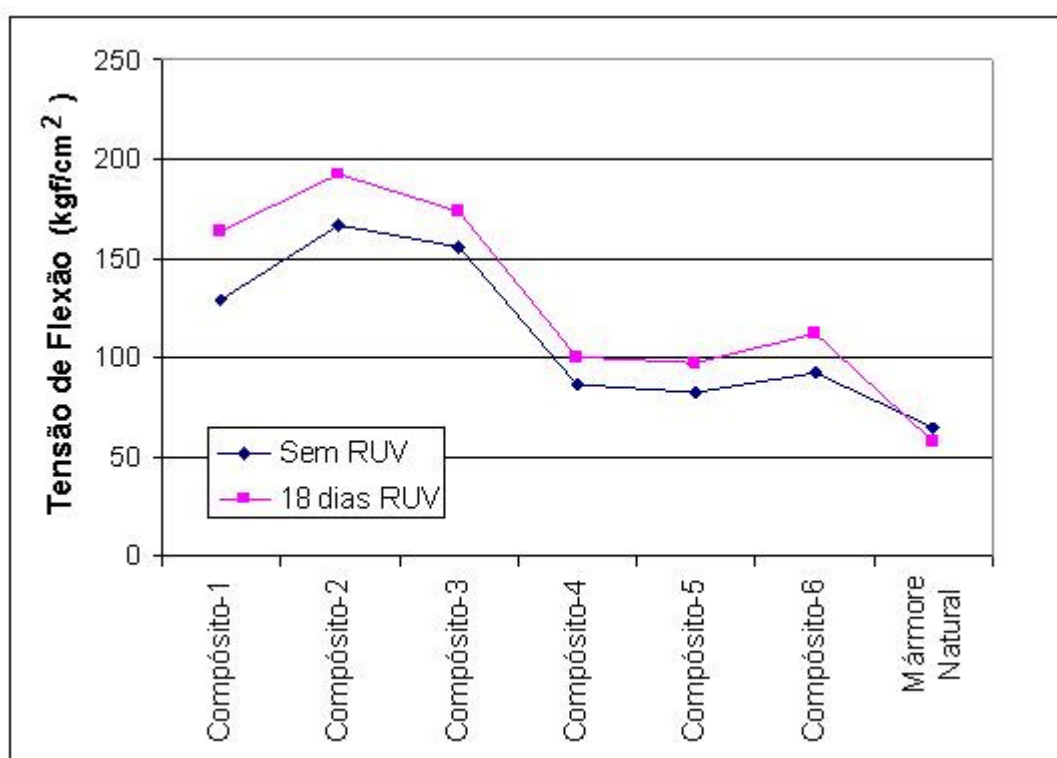
**Figura 4.47.** Comparativos das resistências à compressão dos Compósitos de resina acrílica com granito caju, antes e após Degradação em Radiação UV



**Figura 4.48.** Comparativos das resistências à flexão dos Compósitos de resina acrílica com granito caju, antes e após Degradação em Radiação UV.



**Figura 4.49.** Comparativos das resistências à compressão dos Compósitos de resina acrílica com mármore Branco, antes e após Degradação em Radiação UV.



**Figura 4.50.** Comparativos das resistências à flexão dos Compósitos de resina acrílica com mármore Branco, antes e após Degradação em Radiação UV.

Como se pode ver os resultados mostrados nas Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50 resultados estes comparativos, das tensões de compressão e flexão, dos compósitos de resina Acrílica com o mineral Granito Caju e mármore Branco, antes e após Degradação em Radiação UV, de modo geral, com exceção de alguns pontos, refletem um pequeno aumento das tensões de compressão e flexão após 18 dias de Degradação em Radiação UV. O que pode explicar o fato do aumento das tensões, terem ação com o que comenta CARVALHO (2002), onde em uma cura a frio, situação que aplicamos nos desenvolvimentos dos compósitos, iniciada por radicais livres gerados pelos catalisadores, no caso usou-se o MEK, onde estes quebram as duplas ligações, e estas insaturações abertas geram outros radicais livres (reação em cadeia), até a resina atingir um nível de interligação suficiente para cessar as vibrações moleculares e a cura parar. Neste ponto a resina atingiu sua primeira temperatura de transição vítrea. Portanto, o aumento das interligações restringe as vibrações moleculares e reduz o avanço da cura. Como regra geral os polímeros precisam ser aquecidos acima da temperatura de transição vítrea para que possam retomar a cura. Partindo destes princípios, no decorrer do desenvolvimento dos compósitos procedeu-se usando a estufa após a extração, por 24 horas a 90°C para agilizar o processo de cura onde se teve a primeira temperatura de transição vítrea impedindo as vibrações moleculares e cessou a cura. Os corpos de provas dos compósitos ao entrar em processo de aquecimento novamente quando submetidos à radiação ultravioleta atingiram temperaturas acima da temperatura de transição vítrea e conseqüentemente vibrações moleculares ocorreram permitindo novas interligações melhorando o grau de reticulação (CARVALHO 2002).

Também se pode justificar o pequeno aumento das tensões segundo DE PAOLI (1982) pelo fato de que a energia absorvida por uma molécula em radiação UV, pode rotacionar, vibrar e ou gerar tensões eletrônicas na mesma. Segundo RABELLO (2000) entre o comprimento mínimo da radiação que atinge a terra 290nm até 400nm, energia de um foto (energia da luz) pode atingir em torno de 95,3 Kcal/mol a um comprimento de onda de 300nm. Reforça DE PAOLI (1982) que neste nível de energia elétrons de valência livre são promovidos para orbitais desocupados. No experimento fica evidente que o estabilizante e o absorvedor UV TINUVIN® 123 e 405, nas proporções utilizadas absorveu os fótons de energia da luz emitidos no período até o décimo dia em processo de radiação UV em câmara de envelhecimento acelerado, ou seja, os estados excitados das moléculas impediram que os elétrons de valência livre fossem promovidos a orbitais desocupados evitando a cisão molecular perdendo propriedades mecânicas. A partir do décimo dia, de modo geral, houve alteração do tom da cor dos compósitos, porém esta deformação foi apenas superficial não



atingindo o núcleo dos compósitos, até mesmo pela condição dos minerais que tem a característica de refletir a luz e impedirem o prolongamento das vibrações que pudessem gerar cisão molecular, fato este que também pode justificar o não decréscimo das propriedades mecânicas de compressão e flexão.

#### 4.6 RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

##### 4.6.1 Viabilidade Econômica de Compósitos com Resinas Termofixas com Mineral Granito e Mármore

Os resultados obtidos seguiram os passos conforme citados no Item 3.7.1. A sequência dos resultados do estudo está disposta no Apêndice F.

Segundo informações obtidas pela marmoraria Dalsasso em média as pedras de granito natural, no caso o Caju, são adquiridas da jazida do Estado de Espírito Santo a um custo de R\$ 110,00 /m<sup>2</sup>, isto mostra que o granito natural tipo Caju tem um custo 1,2 vezes maior/m<sup>2</sup> comparado ao Compósito com resina Poliéster, que teve uma estimativa de custo de R\$ 91,53/m<sup>2</sup> e, 1,25 vezes menor/m<sup>2</sup> comparado com o Compósito desenvolvido com resina Acrílica, que apresentou estimativa de custo de R\$ 138,00/m<sup>2</sup>.

O custo do mármore Branco que chega até a marmoraria gira em torno de R\$ 75,00/m<sup>2</sup>. Nestes casos o Compósito com resina Poliéster e mineral mármore teria um custo 1,2 vezes maior/m<sup>2</sup>, ou seja, R\$ 91,53/m<sup>2</sup>, e com resina Acrílica 1,8 vezes maior por metro quadrado, valor este estimado em R\$ 138,00/m<sup>2</sup>.

Analisando de modo geral a estimativa de custos, segundo os entrevistado, demonstraram satisfação em perceber que os custos são viáveis e reconhecem que é uma realidade futura competir com fabricantes de pedras sintéticas. O que comentam também é que estes custos dos Compósitos são baixos perto das pedras com cores cada vez mais exóticas que atualmente vem sendo muito procuradas pelos clientes, ou seja, pedras naturais como granito azul celeste ou mesmo mármore totalmente brancos, tem seus custos acima de R\$ 500,00. Segundo os comentários esta seria a grande vantagem em relação às pedras naturais que são muito caras e perceberam que existe a facilidade de alteração de cores no processamento de Compósitos.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A proposta deste trabalho esteve concentrada em uma metodologia que desenvolvesse compósitos com carga mineral (granito/mármore) em uma matriz polimérica termorrígida com base em resinas poliéster e acrílica, procurando alternativas para a reciclagem de resíduos gerados nas fases de beneficiamento de rochas ornamentais em marmorarias e/ou na etapa de exploração das rochas (lavra).

De forma geral, o processo se mostrou bastante viável, sendo a metodologia capaz de proporcionar a reciclagem desses rejeitos e despertou para a possibilidade de desenvolver novos materiais a custos competitivos com as rochas naturais.

No estudo do comportamento das condições do processo de compressão para a produção de compósitos com resina Poliéster, com pedra Granito Caju, ficou evidente que o excesso da força de fechamento utilizada para a compactação do compósito causava quebra das partículas do mineral, onde estas se desprendiam do compósito. Os melhores compósitos foram obtidos com a força de fechamento de 40 toneladas.

Nos compósitos com resina Poliéster e Granito Caju, ficou demonstrado que as proporções mássicas de 8% de resina não resultavam na boa impregnação dos minerais, reduzindo as tensões de compressão e flexão destes. Nas proporções mássicas de 10% e 15% as umectações dos minerais aparentavam-se perfeitas, e principalmente os compósitos com granulometrias menores (dimensões abaixo de 3,35mm) garantiram excelentes resistências a compressão e flexão.

Os ensaios de microscopia óptica da pedra sintética – Pedra 1, constataram que 50% das dimensões das partículas estavam na faixa abaixo de 1,0mm, 33% na faixa de 1,0mm a 2,0mm e 17% entre 2,0mm a 3,0mm

Já para os ensaios de microscopia óptica para a pedra sintética – Pedra 2, estes demonstraram características dimensionais das partículas muito inferiores que a da Pedra 1. A maior partícula observada foi de 0,627mm.

Nos ensaios do teor de cinza da pedra sintética - Pedra 1, evidenciou-se a quantidade média de resina polimérica igual a 8% em proporção mássica e 92% o compósito era formado por mineral.

No estudo da Pedra 1 através dos ensaios de distribuição granulométrica em peneirador mecânico, também ficou comprovado que 55% das dimensões dos minerais estavam na faixa de 0,074mm a 0,59mm, 15% de 0,59mm a 1,68mm e 30% entre 1,68mm a 3,36mm. Este método de ensaio correspondeu ao método de microscopia óptica.

A identificação qualitativa pelo método FTIR da resina empregada na pedra sintética - Pedra 1 não é nítida, fato que pode estar relacionado com impurezas (mineral) na raspagem da resina quando retirada da pedra. Comparando os três espectros das resinas da sintética - Pedra 1, Poliéster e Acrílica, é evidente algumas similaridades de bandas, o que indica a existência dos mesmos agrupamentos orgânicos nas resinas. Porém, avaliando-se apenas as bandas de maior intensidade, percebe-se pouca semelhança. A banda em torno de  $1728\text{ cm}^{-1}$  ficou bem evidente em todas as resinas, o que sugere a existência de grupo éster. Outro ponto a ser destacado é a existência de anel aromático substituído também em todas as resinas, pois várias bandas que indicam a presença de anel foram identificadas. Entretanto, pode-se concluir que com apenas os resultados de FTIR não se consegue afirmar se a resina polimérica utilizada para a produção da pedra sintética – Pedra 1 é do tipo Poliéster ou do tipo Acrílica, pois as bandas de maior intensidade dessa resina foram identificadas ora no espectro da resina de Poliéster, ora na resina Acrílica.

Nos compósitos com resina Acrílica foi perceptível que as tensões de compressão e flexão são maiores quanto maior foi a proporção mássica de resina no compósito, também melhoram estas propriedades à medida que maior foi a proporção mássica de mineral com menor dimensional (a partir do compósito-5 estas propriedades se elevaram).

A resina Acrílica pura apresentou resistência a compressão inferior aos compósitos. Porém, sua resistência a flexão foi muito maior que as dos compósitos. Isto mostrou que os minerais quando aglomerados a resina dificultam a mobilidade molecular do material sob efeito de tensão.

A perda de resina Acrílica durante o processamento, devido ao escoamento pelas fugas do molde quando a mistura era exposta a compactação, em média, tanto

para o mineral Granito Caju como para o mármore Branco, foi de 3% a 4% em massa, nas proporções ótimas de processamento que foi de 10% a 12% em massa nas misturas dos componentes do compósito. Acima destes percentuais as perdas de resina eram grandes em função da umectação completa da massa e abaixo destes indicativos não se completava totalmente a umectação dos componentes do compósito.

A maior quantidade de resina Acrílica (massa) no desenvolvimento do compósito aumenta as interligações moleculares em torno dos minerais, consequentemente maiores resistências à compressão e flexão, são as condições evidenciadas para as composições com maior massa de resina tanto para o Granito Caju quanto para o mármore Branco, bem como melhores os aspectos superficiais do produto.

O notável desempenho das resistências à compressão e flexão, das pedras sintéticas de resina Acrílica com mármore Branco, comparado ao mármore natural, é justificado pela facilidade de granulometrias homogêneas que o mármore branco apresenta na moagem, condição esta favorável para a boa compactação e coesão dos minerais envolvidos pela resina Acrílica.

As médias de absorção de água nos compósitos, de mármore Branco e Granito Caju, aumentaram com o decréscimo do uso da resina Acrílica. O fato está relacionado com a menor quantidade de invólucro de resina das regiões interfaciais dos minerais, consequentemente a facilidade de penetração da água no interior da estrutura do compósito. Em média os compósitos com Granitos Caju obtiveram a proporção de 0,99% de absorção de água, em contrapartida o Granito Caju natural teve 0,11% de absorção de água. Comparando com os compósitos com mineral mármore Branco, estes apresentaram 0,21% de absorção de água e o mármore natural 0,02%.

De modo geral as características superficiais estéticas e visuais para todos os corpos de provas (compressão ou flexão) dos compósitos (granito e mármore) apresentavam as texturas e tonalidades similares, ou seja, os corpos de provas não aditivados com estabilizantes e absorvedores de ultravioleta demonstravam variações na tonalidade a partir do terceiro dia de radiação e, os corpos de provas aditivados aparentavam mudanças a partir do décimo dia. Significa dizer que a estabilização

mínima contra RUV que foi aplicada, compósitos 2, 4 e 6, demonstraram protegeram os compósitos contra a degradação por radiação UV.

Os compósitos (com granito e mármore), com exceção de alguns pontos, refletiram um pequeno aumento das tensões de compressão e flexão após os 18 dias de Degradação em Radiação UV. Os compósitos ao entrar em processo de aquecimento novamente quando submetidos à radiação ultravioleta atingiram temperaturas acima da temperatura de transição vítrea e conseqüentemente vibrações moleculares ocorreram permitindo novas interligações moleculares melhorando o grau de reticulação.

A estimativa da viabilidade econômica do desenvolvimento de compósitos com resina Poliéster e resina Acrílica com carga mineral (granito/mármore), comprova ser competitiva comparada a produção de rochas ornamentais exóticas que atualmente vem sendo muito procuradas pelos clientes, ou seja, pedras naturais como granito azul celeste ou mesmo mármore totalmente brancos, tem seus custos muito superiores ao que demonstrou o estudo da viabilidade econômica dos compósitos.

A metodologia mostrou que o modelo estudado pode ser sustentável para o desenvolvimento de novos materiais compósitos para o setor de mineração da área de rochas ornamentais. A utilização dos rejeitos de materiais de pedras para o desenvolvimento de rochas sintéticas, mostra vantagens na diminuição da quantidade de rejeito a ser descartada na natureza, além de agregar valor a um resíduo indesejável, e possibilita também a geração de novos empregos.

Como sugestões para trabalhos futuros ficam a necessidade de melhor caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos sob efeitos de menor tempo de compactação na fase do processamento destes.

Adicionalmente, com a finalidade de comprovar a adequação dos compósitos em situações agressivas expressas pelo ambientes, como cozinhas, na fabricação de piaas, verificar a ação dos agentes químicos como óleos comestíveis, produtos cítricos e ataques aos riscos.(resistência a abrasão).

Por fim, estudar os meios para melhorar os aspectos relacionados a estética superficial, como o brilho. A Sugestão seria aplicar uma resina final após os polimentos mecânicos.

## REFERÊNCIAS

AIGUEIRA; RAFAELA B., FILGUEIRA; MARCELO. **Mecanismo e Resistência à Abrasão de Compósitos à Base de Poliéster-SiC para Uso em Coroas de Polimento de Rochas Ornamentais.** Artigos Técnicos Científicos. Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 16, n° 3, p. 187-192, 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Polymer Concrete – Structural Applications State-of-The-art Report (ACI 548.6R-96)** ACI Committee 548, USA, 1996, 23p.

AMICO, SANDRO C. **Materiais Compósitos Poliméricos.** Curso aberto na UDESC. Joinville – SC. 2006. LAPOL/UFRGS

BRETON COMPANY. **Plants for Manufacturing Natural Stone Surfaces by Breton Technology.** Disponível em <<http://www.breton.it/dynamic/en/azienda/filosofia.php?PHPSESSID=7589075f46902f6787a285ee1fd4a116>>. Acesso em Junho 2006.

BRETON. **The Product Breton® Quartz.** Lineadue Bassano VI. Printing Italy. 2000.

BRYDSON, JOHN. **Plastics Material.** 7ª Edição, Butterworth-Heinemann. Oxford. 1999.

CAESARSTONE. **CaesarStone Quartz Surfaces.** Disponível em <<http://www.caesarstoneus.com/catalog/technical-specs.cfm>>. Acesso em Janeiro 2007.

CALDERONI, SABETAI. **Os Bilhões Perdidos no Lixo.** Humanistas FFLCH/USP, 4ª Edição. São Paulo – SP. 2003.

CALLISTER JR, WILLIAM D..**Ciência e Engenharia de Materiais.** Editora LTC, 5ª Edição. 2002.

CARNEVAROLO JR, SEBASTIÃO V. **Ciência dos Polímeros.** Artliber editora Ltda. São Paulo – SP. 2002

CARVALHO, A. **Cura e Pós-Cura De Resinas Poliéster e Vniléster**. 1ª Edição, Polyplaster Ltda. Belo Horizonte, 2002.

CHIODI, CID FILHO. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Primeiro Semestre de 2006**. ABIROCHAS. São Paulo – SP. 2006.

CIBA SPECIALTY CHEMICALS. **Ciba® Tinuvin® 123**. Disponível em <<http://www.cibasc.com/pf/>>. Acesso em 18 de julho de 2006. Edição 9/12/97.

CIBA SPECIALTY CHEMICALS. **Ciba® Tinuvin® 405**. Disponível em <<http://www.cibasc.com/pf/>>. Acesso em 18 de julho de 2006. Edição 9/12/97.

COMPAC MARMOL E QUARTZ. **El Cuarzo Tecnológico**. Disponível em <[http://www.compacmq2.com/web/portugues/producto/mc\\_prodv.php?link=abe1d2d1](http://www.compacmq2.com/web/portugues/producto/mc_prodv.php?link=abe1d2d1)>. Acesso em junho de 2006.

CORRÊA, MARCELO DE PAULA. **Índice Ultravioleta: Avaliações e aplicações**. São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2003.

DALSSASSO, MARCIO JOSÉ. **Comunicação Pessoal**. Entrevista concedida à Écio José Molinari. Joinville, SC. Março de 2007.

DE PAOLI, MARCO-AURÉLIO. **Estudo do Mecanismo da Foto-oxidação do Polibutadieno Coperbo BR-45**. Campinas – SP. Tese de Livre Docência, Universidade de Campinas, 1982.

DIEZ; SERGIO GARCIA. **Metodologia de la Colada Directa Aplicada a la Escultura**. Revista Iberoamericana de Polímero – Garcia – Colada Directa. Volumen 7(4), Diciembre de 2006

FORLIN, FLÁVIO J. ; FARIAS, JOSÉ DE ASSIS F.. **Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas**. Revista Polímeros Ciência e Tecnologia, São Carlos, vol 12, nº1, pp. 1-10, 2002

GNAUCK, BERNHARD. FRÜNDT, PETER. **Iniciación a La Química de Los Plásticos**. 1ª edición española. Hanser Editorial, S. L. . Barcelona, 1992.

GRIJÓ, PAULO EDUARDO ANTUNES; BAASCH, SANDRA SULAMITA NAHAS. **Estudo para Uso dos Dejetos da Indústria do Surf**. Resíduos Sólidos – Revista: SANEAMENTO AMBIENTAL - nº 100 - Novembro/Dezembro de 2003.

HAGE JÚNIOR, E. **Introdução aos materiais compósitos**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1990.

ITTNER, CRISTINA A.; FELISBERTI, MARIA ISABEL. **Cinética de Cura de Compósitos à Base de Resina Éster Vinílica e Sílica Funcionalizada**. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14, 2000, São Pedro - SP.

JOHN, VANDERLEY M.; ROCHA, JANAÍDE CAVALCANTE. **Utilização de Resíduos na Construção Civil**. Coletânea Habitare, Vol. 4. Porto Alegre. 2003.

LINTZ; ROSA CRISTINA CECHE. **Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta**. Campinas - SP. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.

MACHADO, R. A. F. ; KNIES, C. T. ; LOPES, C. N. ; CHECCHINATTO, F. ; GUARIDO, C. E. ; MILANEZ, K. W. ; KUHNEN, NIVALDO CABRAL ; RIELLA, H. G. . **Reaproveitamento de resíduos industriais**. Acta Ambiental Catarinense, Chapecó, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2002.

MANO, ELOISA BIASOTTO. **Polímeros Como Materiais de Engenharia**. Editora Edgard Blücher Ltda. 1ª Edição. São Paulo – SP. 1991.

MEDINA H. V. DE, **Clean technologies for recycling**. In: Daniel Brissaud, SergeTichkiewitch and Peggy Zwolinski, Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development, Springer, Netherlands. pp. 199-208.2006.



MEDINA H. V. DE. **Análise do ciclo de vida aplicada à pesquisa e desenvolvimento de ecomateriais no Brasil.** pp. 310-330, *In: Avaliação do Ciclo de Vida: a ISO 14000 na América Latina*, organizado por Caldeira-Pires A., Souza-Paula M.C. e Villas Boas R.C., Editora ABIPIT, apoio CNPq, CYTED e UNB, Brasília, 330 p. 2005.

MENDONÇA, RENATA MAÉRY DE LIMA; PIRATELLI-FILHO, ANTONIO; LEVY-NETO, FLAMÍNIO; **Compósitos Particulados Para Aplicações Em Engenharia De Precisão: Obtenção E Propriedades Mecânicas.** Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. Engenharia Mecânica, 70910-900, Brasília, DF, Brazil, 2002.

MENEZES; ROMUALDO R., NEVES; GELMIRE DE A., FERREIRA; HERBER C. O **Estado da Arte Sobre o Uso de Resíduos como Matérias-primas Cerâmica Alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 6, n. 2, p. 303-313. 2002.

MIRANDA, LUIZ LUNA FREIRE DE; et al. **Mármore Bege Bahia em Ourolândia-Mirangaba-Jacobina, Bahia: Geologia Potencialidade e Desenvolvimento Sustentável.** Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Salvador: CBPM, 2002.

MOITA NETO, JOSÉ MACHADO. **Compósitos.** Governo do Estado do Piauí – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí. Teresina – PI , março de 2006.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. **Utilização de Resíduos de Serragem de Granito Proveniente do Estado do Espírito Santo em Cerâmica Vermelha.** CCT-LAMAV, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro – RJ. 2003

MOTHÉ, HITOR FERNANDES FILHO; POLIVANOV, HELENA; MOTHÉ, CHEILA GONÇALVES. **Reciclagem de Resíduos Sólidos de Rochas Ornamentais.** Anuário do Instituto de Geociências – ISSN 0101-9759 – UFRJ – Rio de Janeiro – RJ. 2005

MOTTA, LEILA A. DE CASTRO. SILKUNA, NELSON. RODOLFO JUNIOR, ANTONIO. **Durabilidade dos Polímeros.** Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2002.

NETO, JOSÉ R. A.; CARVALHO, LAURA H. DE; ARAÚJO, EDCLEIDE M. **Influência da Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta.** Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 17, nº 1, p. 10-15, 2007

RABELLO, MARCELO SILVEIRA. **Aditivação de Polímeros.** Artliber Editora. São Paulo, 2000.

RESANA. **Poliéster Insaturado – Resistência Química.** Guia de Aplicações. Resana S.A. Indústrias Químicas. São Paulo, SP, 1992.

SAKAI; TSUYOSHI. **Artificial Stone Composition and Method of Manufacturing Artificial Stone.** Patent Number 6,127,458. Appl. Nº 08/836,105. United States Patent. Oct. 3, 2000.

SILVERSTEIN, ROBERT M.; WEBSTER, FRANCISCO X. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos.** 6ª Edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro – RJ. 2000.

SMITH, JOHN K.. **Turning Silk Purses into Sows' Ears: Environmental History and the Chemical Industry.** Enterprise & Society 1. 2000 by the Business History Conference. USA. December 2000

TAWFIK; M. E., ESKANDER; S. B. **Polymer Concrete from Marble Wastes and Recycled Poly(ethylene terephthalate).** SAGE Publication. Journal of Elastomers and Plastics, Vol. 38 – January 2006.

TORRES, BAYARDO BAPTISTA; CARVALHO, ADRIANA; EGÍDIO, CAMILA MOURA. **Bioquímica da Beleza.** Departamento de Química. Instituto de Química – Universidade de São Paulo. São Paulo. Abril de 2005.

WHITE, J. R.; TURNBULL, A. **Review. Weathering of polymers: mechanisms of degradation and stabilization, testing strategies and modelling.** Journal of Materials Science, Londres, v. 29, p. 584-613, 1994.

## APÊNDICE - A

### 1- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA RESINA POLIÉSTER ORTOTEREFTÁLICA ARAZYN®

Na Tabela A.1 estão representados os dados técnicos da resina poliéster ortotereftálica Arazyn®, tipo AZ 3.7#05, lote 2714 do fabricante Ara Química S.A.

**Tabela A.1.** Dados de análises técnicas da resina poliéster ortotereftálica Arazyn®

Produto: Arazyn® AZ 3.7#05, lote 2714	
Ensaio	Resultados
Viscosidade Brookfild 25°C SP2/12 rpm	730 cps
Gel time 25 °C, 1,0g MEK em 100g resina	12,67 min
Intervalo de pico	10,67 min
Pico exotérmico	170 ° C
Teor de sólidos	66,60 %

Fonte: Adaptado da ficha técnica do certificado do produto comercializado pela empresa CRE Indústria e Comercio de Produtos Químicos e Artefatos Plásticos.

## APÊNDICE - B

### 1- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA RESINA ACRÍLICA POLARIS®

Na Tabela B.1 estão representados os dados técnicos da resina acrílica Polaris®, tipo PL SS 7132-19, lote 5035-L, fabricante ASHLAND.

**Tabela B.1.** Dados de análises técnicas da resina acrílica Polaris®

Produto: Polaris® PLSS 7132, lote 5035-L	
Ensaio	Resultados
Viscosidade Brookfild 25°C SP#3 60rpm	510 cps
Gel time 25°C	18,0 min
Intervalo de pico	8,3 min
Pico exotérmico	108 °C
Teor de sólidos	60,9%

Fonte: Adaptado da ficha técnica do certificado do produto comercializado pela empresa Araquímica.

## APÊNDICE - C

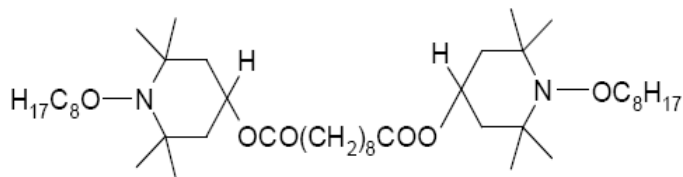
### 1 TINUVIN® 123

Características técnicas do estabilizante a luz TINUVIN® 405 [CIBA SPECIALTY CHEMICALS, 2006].

#### 1.1 Geral

TINUVIN® 123 é um estabilizante tipo HALS (*hindered amine light stabilizer*) com funcionalidade baseada em amino-éter. Este previne interações com ingredientes ácidos de pinturas tais como as catálises. Sua eficiência prevê significantes melhorias no desempenho das camadas minimizando defeitos de pintura, como rachaduras e mantém o brilho superficial.

#### 1.2 Composição química:



*Acido decanoico, bis(2,2,6,6-tetrametil-1-(octiloxi)-4-piperidina) ester*

#### 1.3 Propriedades físicas

Peso molecular médio: 737 g/mol

Aparência: limpo, líquido ligeiramente amarelado.

Densidade: a 20°C é igual a 0,97 g/cm<sup>3</sup>

#### 1.4 Aplicações

- a) Automotiva e na indústria de revestimento por camadas.
- b) Pinturas decorativas em madeiras ou aplicadas em vernizes.

TINUVIN® 123 foi desenvolvido principalmente para superfícies de revestimento sólidas.

A forma líquida de TINUVIN® 123 também permite facilmente a emulsificação fácil em sistemas que resistem a águas.

O desempenho do TINUVIN® 123 pode ser incrementado quando utilizado em combinação com um absorvedor de luz UV. Em camadas automotivas, a combinação do TINUVIN® 123 com um absorvedor de UV TINUVIN® 384, TINUVIN® 1130, TINUVIN® 928 ou TINUVIN® 400, incrementaria a resistência ao envelhecimento e promoveria proteção superior contra redução de brilho, rachaduras, troca de cores e delaminações.

### **1.5 Concentrações recomendadas**

As concentrações são baseadas em porcentagens de peso.

Na indústria automotiva (camadas/pinturas): 0,5 – 2% de TINUVIN® 123 mais 1 – 3% de TINUVIN® 384, TINUVIN® 1130, TINUVIN® 928 ou TINUVIN® 400.

Para pinturas decorativas em madeiras: 0,5 – 2% de TINUVIN® 123 ou em combinação com 1 – 3% de TINUVIN® 384 ou TINUVIN® 1130.

## APÊNDICE - D

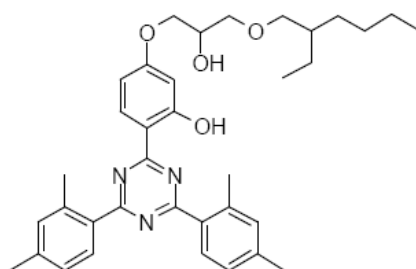
### 1 TINUVIN® 405

Características técnicas do estabilizante a luz TINUVIN® 405 [CIBA SPECIALTY CHEMICALS, 2006].

#### 1.1 Geral

TINUVIN® 405 é um absorvedor de UV do tipo hidroxifeniltriazina designado para alto desempenho em aplicações de camadas (coberturas). A baixa volatilidade, a alta estabilidade térmica e elevada absorção de UV permite proteção superior para coberturas que possuem substâncias sensíveis a luz.

#### 1.2 Composição química



*2-[4-[(2-hidroxi-3-(2-etil)hexil)oxi]-2-hidroxifenil]-4,6-bis(2,4-dimetilfenil)-1,3,5-triazina*

#### 1.3 Propriedades físicas

Peso molecular médio: 583,78 g/mol

Aparência: pó cristalino amarelado

Temperatura de fusão: 74 – 77 °C

#### 1.4 Aplicações

TINUVIN® 405 é recomendado para uso em camadas com base em acrílico catalisado e resinas poliéster. As principais áreas de aplicações são:

- a) coberturas limpas (transparentes) na indústria automotiva;
- b) coberturas limpas (transparentes) em pó na indústria automotiva;

- c) Camadas em pó para produtos plásticos e madeiras;
- d) Indústria de modo geral para laminados (coberturas).

É recomendado o uso do TINUVIN® 405 em combinação com estabilizantes a luz da classe HALS, tais como TINUVIN® 144, TINUVIN® 152, TINUVIN® 292 ou TINUVIN® 123. Estas combinações produzem sinergismo nos efeitos de proteção contra redução de brilho, rachaduras, bolhas, delaminação e troca de cor.

### **1.5 Concentrações recomendadas**

As concentrações são baseadas em porcentagens de peso:

1,0 – 3% TINUVIN® 405 junto com

0,5 – 2% TINUVIN® 144, TINUVIN® 152 para camadas em pó ou,

0,5 – 2% TINUVIN® 292, TINUVIN® 123 pinturas líquidas.



## APÊNDICE - E

### 1 Ensaio de teor de cinzas da Pedra 1

As Tabelas E.1, E.2 e E.3 apresentam os resultados do ensaio de teor de cinzas nas amostras da pedra sintética – Pedra 1.

**Tabela E.1.** Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº1 da pedra sintética – Pedra 1.

Massa da amostra	$M_{\text{amostra}}$	58,1999 g
Massa do cadinho	$M_{\text{cadinho}}$	41,7999 g
Massa do cadinho + massa da amostra	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}$	99,9998 g
Massa do cadinho + massa da amostra queimada	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}}$	95,3682 g
Massa queimada	$M_{\text{queimada}} = (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}) - (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}})$ $M_{\text{queimada}} = 99,9998\text{g} - 95,3682$ $M_{\text{queimada}} = 4,6316\text{ g}$	
Massa resultante da amostra queimada ( $M_{\text{RAQ}}$ )	$M_{\text{RAQ}} = M_{\text{amostra}} - M_{\text{queimada}}$ $M_{\text{RAQ}} = 58,1999\text{ g} - 4,6316\text{ g}$ $M_{\text{RAQ}} = 53,5683\text{ g}$	

Admitindo-se que o resíduo que sofreu a queima compreendia a parcela total de polímero termofixo contido na pedra (ou seja, 4,6316 g, ver Tabela E.1) obteve-se então que essa quantidade, em termos percentuais em relação à massa total da amostra nº1, era de 7,95%.

**Tabela E.2.** Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº2 da pedra sintética – Pedra 1.

Massa da amostra	$M_{\text{amostra}}$	61,3455 g
Massa do cadinho	$M_{\text{cadinho}}$	43,3727 g
Massa do cadinho + massa da amostra	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}$	104,7182 g
Massa do cadinho + massa da amostra queimada	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}}$	99,7158 g
Massa queimada	$M_{\text{queimada}} = (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}) - (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}})$ $M_{\text{queimada}} = 104,7182\text{g} - 99,7158$ $M_{\text{queimada}} = 5,0024\text{ g}$	
Massa resultante da amostra queimada ( $M_{\text{RAQ}}$ )	$M_{\text{RAQ}} = M_{\text{amostra}} - M_{\text{queimada}}$ $M_{\text{RAQ}} = 61,3455\text{ g} - 5,0024\text{ g}$ $M_{\text{RAQ}} = 56,3431\text{ g}$	

**Tabela E.3.** Resultados do ensaio de teor de cinzas da amostra nº3 da pedra sintética  
– Pedra 1

Massa da amostra	$M_{\text{amostra}}$	60,6758 g
Massa do cadinho	$M_{\text{cadinho}}$	41,8793 g
Massa do cadinho + massa da amostra	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}$	102,5551 g
Massa do cadinho + massa da amostra queimada	$M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}}$	97,6469 g
Massa queimada	$M_{\text{queimada}} = (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra}}) - (M_{\text{cadinho}} + M_{\text{amostra queimada}})$ $M_{\text{queimada}} = 102,5551 \text{ g} - 97,6469 \text{ g}$ $M_{\text{queimada}} = 4,9082 \text{ g}$	
Massa resultante da amostra queimada ( $M_{\text{RAQ}}$ )	$M_{\text{RAQ}} = M_{\text{amostra}} - M_{\text{queimada}}$ $M_{\text{RAQ}} = 60,6758 \text{ g} - 4,9082 \text{ g}$ $M_{\text{RAQ}} = 55,7676 \text{ g}$	

Da mesma forma que a análise anterior, obteve-se que a quantidade de polímero termofixo que foi queimado durante o ensaio das amostras nº2 e nº3 da pedra sintética – Pedra 1 foi de 5,0024 g (Tabela E.2) e 4,9082 g (Tabela E.3), respectivamente.

## APÊNDICE - F

### 1 Resultados do Estudo de Viabilidade Econômica

a) Quantidade do mineral granito necessária para confeccionar 1m<sup>3</sup> de Compósito.

No desenvolvimento de um Compósito (placa) empregou-se 600g de mineral granito (tipo Caju) em um molde de diâmetro igual a 144mm ou 0,144m. Através destes dados determinou-se a massa de granito por metro cúbico ou por 0,02m<sup>3</sup> que foi uma medida aplicada nos Compósitos desenvolvidos (placa). Então, a área produzida no molde foi de:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \frac{0,144^2}{2} = 0,016286\text{m}^2, \text{ como a espessura comercializada é em torno}$$

de 2,0cm, ou seja, 0,02m, o volume produzido para a área anterior foi:

$$V = A \cdot 0,02\text{m} = 3,26 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

De posse do volume foi possível determinar a massa de um Compósito de 1m<sup>2</sup> com espessura de 0,02m (1,0mx1,0mx0,02m) que tem um volume de 0,02m<sup>3</sup>. Ou seja, para o Compósito que desenvolvemos com volume de  $3,26 \times 10^{-4} \text{m}^3$ , usamos 600g de granito, então para 0,02m<sup>3</sup> (regra de três) teríamos uma massa de 36,84kg.

Se fossemos desenvolver um bloco de 1m<sup>3</sup>, dividindo este em placas de 0,02m, teríamos um total de 50 Compósitos ou placas (ver item “b”), então este bloco (Compósito) apresentaria uma massa de (50 placas X 36,84 kg) = 1842 kg.

b) Determinação do número de Compósitos que se pode desenvolver em um bloco de 1m<sup>3</sup>.

Uma pedra (placa) de 1m<sup>2</sup> e espessura de 0,02m têm massa de 36,84kg de granito. Para um bloco de 1m<sup>3</sup> temos massa de 1842kg, ou seja:

$$\text{Número de compósitos} = \frac{1842}{36,84} = 50 \text{ placas}$$

c) Custos de moagem (obtenção de partículas finas) por metro cúbico do granito.

Como não é comum a moagem individual deste tipo de mineral baseou-se os cálculos no custo da moagem de pedras tipo britas, que varia em torno de R\$ 35,00/m<sup>3</sup>. (Informação da britadeira Volgzanger – Joinville – SC)

Segundo MIRANDA (2002) o granito tipo Caju tem densidade 2,556g/cm<sup>3</sup>, ou seja, 2556 kg/m<sup>3</sup>. Para moer (reciclar) o granito na granulometria empregada no

trabalho teríamos um custo de R\$ 35,00 para uma quantidade de 2556 kg. No caso em estudo para desenvolver 50 Compósitos, usaríamos 1842 kg de mineral. Então para esta quantidade o custo (regra de três) de reciclagem seria de R\$ 25,22

d) Custo da resina para 50 Compósitos.

Através dos resultados percebeu-se que a quantidade de 10% em massa de resina apresentou para os Compósitos, boas propriedades de tensão de compressão e flexão. Então 10% em massa de resina sobre uma quantidade de 1842kg (que equivale a 90% em massa no Compósito), usando (regra de três), calculou-se que necessita-se de 205kg de resina. O custo da Resina termofixa varia no mercado em torno de R\$ 10,00/kg. Para confeccionar 1842 kg do Compósito com granito, necessita-se 205 kg de resina a um custo (regra de três) de R\$ 2050,00.

e) Custo dos aditivos contra radiação ultravioleta.

No trabalho desenvolvido 0,5% de Tinuvin® 123 mostrou bom desempenho nos Compósitos. Então para um total de 250 kg de resina, para fazer 50 placas, usar-se-ia 0,5% em massa de aditivo Tinuvin® 123. Então 0,5% de 250kg é igual a 1,3kg de aditivos.

Os valores giram em torno de R\$ 100,00 / quilograma do estabilizante ultravioleta Tinuvin® 123 e o mesmo valor do quilograma para o Absorvedor Ultravioleta Tinuvin® 405. Então o custo do Tinuvin®123 seria (1,3kg x R\$ 100,00) de R\$ 130,00.

No trabalho desenvolvido 1,0% de Tinuvin® 405 também mostrou bom desempenho. Para um total de 250kg de resina aplicaríamos 1,0% de Tinuvin 405, que equivale a uma massa de 2,50Kg a um custo (2,50kg x R\$100,00) de R\$ 250,00

f) Custo do catalisador.

Empregou-se o catalisador Metil-etil-cetona (MEK). Atualmente o custo deste produto é R\$ 13,00/litro (1000ml). Nos Compósitos desenvolvidos empregou-se 1,5ml para cada 100g de resina. Então para 250kg (250000g) de resina consumiríamos 3750ml, ou seja, 3,75 litros (3,75 x R\$13,00) a um custo de R\$ 48,75

g) Custo de material para limpeza (solução de limpeza), para molde, equipamentos e outros acessórios.

Supondo o gasto de 0,5 l/m<sup>2</sup> de solução de limpeza, em um total de 50 placas de Compósitos, ou seja, 50m<sup>2</sup> teríamos um consumo de 25 litros. O custo de um litro de solução de limpeza é R\$ 5,00. O custo total (é de 25 litros x R\$5,00 = R\$ 50,00 para 50m<sup>2</sup> de Compósito)

#### h) Determinação do tempo de produção.

Para um molde de 0,80m de largura e comprimento de 2,5m, teríamos um total de  $2\text{m}^2$  de área produzida com espessura de 2,0 cm (0,02m).

No desenvolvimento das pedras do nosso trabalho o tempo de ciclo girou em torno de 60 minutos. Após domínio do processo, percebemos que seria possível estimar o tempo de 50 minutos para produzir  $2\text{m}^2$ , ou seja, um ciclo. Então para produzir  $50\text{m}^2$  o tempo total de produção seria de 1250 minutos que equivale 20,83 horas. Em paralelo a este tempo de produção os primeiros Compósitos já estão sob o efeito do condicionamento em estufa para acelerar o processo de cura.

#### i) Custo de mão-de-obra

Para esta velocidade de produção, estimamos 3 pessoas no processo, dividindo uma para a preparação do material, uma para o processamento e uma para o acabamento dos produtos (beneficiamento), sendo que as atividades extras, como por exemplo; limpeza e organização das áreas de trabalho todos estariam aptos a desenvolver.

Em média as marmorarias pagam aos funcionários em torno de R\$ 4,50/hora. Estima-se mais 60% de impostos, isto daria um custo por homem hora de R\$ 7,20. Para 3 pessoas o custo de mão-de-obra para 20,83 horas seria de R\$ 450,00

#### j) Custo do consumo do equipamento prensa.

Uma prensa de 100 toneladas atenderia a solicitação do processo, com uma bomba hidráulica acionada por um motor de 10CV com potência de 7,5 kw.

O custo da energia é R\$ 0,38/kWh. Supondo que dos 50 minutos do ciclo é necessário à bomba da prensa ficar ligada somente na fase do tempo gel (pré-cura do polímero) que gira em torno de 20 minutos. Então em 20 min. produziríamos  $2\text{m}^2$  de Compósito (com a bomba ligada), para desenvolver  $50\text{m}^2$  teríamos um tempo de consumo energia de 500 min., que equivalem 8,33 horas. Neste tempo o equipamento consumiria  $7,5\text{kw} \times 8,33\text{horas}$ , igual a 62,5kWh a um custo ( $62,5\text{kwh} \times \text{R\$ } 0,38/\text{kwh}$ ) de R\$ 23,75.

#### k) Custo do consumo do equipamento estufa

O equipamento estufa de circulação de ar quente tem potência de 3kw. Considerando em média o tempo de 24 horas para a complementação da cura do Compósito, teríamos em média neste equipamento o consumo ( $3\text{kw} \times 24\text{ horas}$ ) de 72kwh. Mas como o equipamento não tem capacidade para acomodação de todas os

Compósitos necessitaríamos de uma segunda carga, ou seja, mais 24 horas de trabalho, então o consumo total dos dois dias de trabalho chegaria a 144kwh. O valor do consumo de energia ( $144\text{kwh} \times \text{R\$}0,38/\text{kwh}$ ) é igual a R\$ 54,72

l) Custo do consumo de um misturador

Para desenvolver a mistura de  $2\text{m}^2$  de material (mineral, aditivos e resina) necessitaríamos de um misturador com um motor de 1CV que equivale à potência de 0,742kw. Dos 50 min. do ciclo este equipamento ficaria ligado somente 12 minutos. Tempo total ligado do equipamento para desenvolver  $50\text{m}^2$  seria de 300 min. que equivale 5 horas.

O consumo de energia em 5 horas ( $0,742\text{kw} \times 5 \text{ horas}$ ) seria de 3.71kwh, a um custo ( $3,71\text{kwh} \times \text{R\$} 0,38/\text{kwh}$ ) de aproximadamente R\$ 1,41

m) Custo do beneficiamento.

O beneficiamento do granito natural envolve cortes polimentos. Segundo entrevista com responsáveis da marmoraria em média este custo (abrasivos, energia, lâminas de corte, ceras, água) gira em torno de R\$ 12,00 / $\text{m}^2$ . Então o custo do beneficiamento dos  $50\text{m}^2$  seria de R\$ 600,00

n) Preço dos rejeitos de mármore e granitos

Segundo entrevistas com marmorarias os rejeitos são encontrados a um valor de R\$ 5,00/ $\text{m}^2$ . Para nosso caso a confecção de  $50\text{m}^2$  de pedra sintética teria um custo de matéria-prima (rejeitos) de R\$ 250,00

o) Transporte dos rejeitos

Informações através de entrevistas mostram o custo do frete em torno de R\$ 2,50/km o equivalente a  $250 \text{ m}^2$  por transporte. A densidade do granito Caju é  $2,556 \text{ g/cm}^3$  ou  $2556 \text{ kg/m}^3$ , então dividindo um bloco de 1,0m por 2,0 cm (0,02m) teríamos 50 placas, ou seja, este bloco com massa de 2556kg dividido por 50 pedras (de  $1\text{m}^2$ ), nos possibilitaria dimensionar a massa de uma pedra que é de 51,12kg. Então um frete de  $250\text{m}^2$  de granito equivale a 12780kg. Supondo um deslocamento de 30km por transporte (local do rejeito - moagem - empresa transformadora dos rejeitos), o custo de 30 km seria ( $30\text{km} \times \text{R\$}2,50$ ) de R\$ 75,00. Para fabricar 50 placas (definido no Item “b”) a massa seria de 1842 kg. Por regra de três determinamos que R\$ 75,00 seria o valor do transporte de 12780 kg para a quantidade de 1842 kg o custo seria de R\$ 10,80.

p) Custos de controle de qualidade.

Segundo entrevista existe uma perda (peças não conforme) que giram em torno de 10% da capacidade produtiva. No nosso caso podemos considerar que das 50 pedras produzidas, 10% de refugo é igual a 5 Compósito, então 45 pedras seria a produção conforme (ou 45m<sup>2</sup>).

q) Custos dos retrabalhos.

Outro dado considerado (obtido por entrevista) como perdas (retrabalhos, inadimplência, aumentos de materiais não planejados) giram em torno de 5%. Então 5% de 50 Compósitos é 2,5 pedras, ou seja, 3 pedras (3m<sup>2</sup>) de perdas. Então o total de peças conforme (considerando Item “p” mais os retrabalhos) seria 42 (ou 42m<sup>2</sup>).

r) Custo total da produção

Das análises anteriores o custo total da produção sem as perdas seria de R\$ 3.944,65. Dividindo este valor por 50 Compósitos teríamos um custo de R\$ 79,00 por Compósito (ou m<sup>2</sup>).

Considerando uma perda de 8 Compósito (8m<sup>2</sup>), o custo seria de (R\$ 79,00 x 8= R\$ 632,00). Então o custo total da produção de 50 Compósitos seria (R\$ 3.944,65 + R\$ 632,00) que equivale a R\$ 4.576,65. Então o custo de produção de um Compósito (R\$ 4.576,65 / 50 ) ficou estimado em R\$ 91,53.

Para melhor entendimento dos cálculos os dados foram dispostos na Tabela F.1. Podemos considerar que o custo para desenvolver um Compósito com o mineral mármore com resina poliéster seria equivalente ao que calculamos anteriormente para o mineral granito (R\$ 91,53), devido as fases do processo serem idênticas em relação a consumo de energia, resina e peso do mineral ( densidade do mármore branco é 2,786g/cm<sup>3</sup>), ou seja, 1,1 vez maior que a do granito Caju (d= 2,556 g/cm<sup>3</sup>) densidade esta que não alteraria a média do custo final da pedra.

Considerando que o preço da resina acrílica tem um acréscimo de 50% sobre o preço da resina poliéster (no caso para produzir 50 Compósitos seria necessário 205 kg de resina a um valor de R\$ 2.050,00), com acréscimo de 50% para a resina acrílica este custo ficaria em R\$ 3.075,00. Considerando todas as demais fases do processo com custos equivalentes aos definidos, um Compósito com resina acrílica (1m<sup>2</sup>), com mineral granito ou mármore teria um custo de R\$ 138,00.

**Tabela F.1.** Custo por metro quadrado de compósitos com mineral granito e resina poliéster

<b>Materiais e operações do processo</b>	<b>Custos dos materiais e operações do processo</b>	<b>Custos por m<sup>3</sup> do Compósito</b>
Reciclagem dos rejeitos de granito (moagem)	R\$ 25,22 /1842 kg	R\$ 25,22
Resina poliéster	R\$ 10,00 / kg	R\$ 2.050,00
Estabilizante UV Tinuvin® 123	R\$ 100 / kg	R\$ 130,00
Absorvedor UV Tinuvin® 405	R\$ 100/ kg	R\$ 250,00
Catalisador (MEK)	R\$ 13,00 / litro	R\$ 48,75
Agente de limpeza	R\$ 5,00 / litro	R\$ 50,00
Mão-de-obra (3 pessoas)	R\$ 4,50 + 60% impostos/pessoa	R\$ 450,00
Energia para prensa	R\$ 0,38/kwh em um total de 62,5kwh	R\$ 23,75
Energia para estufa	R\$ 0,38/kwh em um total de 144kwh	R\$ 54,72
Energia para misturador	R\$ 0,38/kwh em um total de 3,71kwh	R\$ 1,41
Beneficiamento	R\$ 12,00 / m <sup>2</sup>	R\$ 600,00
Custos dos rejeitos	R\$ 5,00/m <sup>2</sup>	R\$ 250,00
Transporte	R\$ 2,50/km/250m <sup>2</sup>	R\$ 10,80
Custo total		R\$ 3.944,65
O custo total por Compósito (ou m <sup>2</sup> ) é R\$ 79,00		
Refugo (controle de qualidade)	R\$ 79,00 (10% de 50 pedras = 5 pedras)	R\$ 395,00
Outros (perdas)	R\$ 79,00 ( 5% de 50 pedras ± 3 pedras)	R\$ 237,00
Custo total de 1m <sup>3</sup> com perdas	R\$ 3.944,65 + R\$ 395,00 + R\$ 237,00	R\$ 4.576,65
Custo de uma pedra sintética (ou 1m <sup>2</sup> ).	R\$ 4576,65 / 50 pedras (1m <sup>2</sup> )	R\$ 91,53/m <sup>2</sup>

Em contrapartida segundo informações obtidas pela marmoraria Dalsasso em média as pedras de granito natural, no caso o Caju, é adquirido da jazida do Estado de Espírito Santo a um custo de R\$ 110,00 /m<sup>2</sup>, isto mostra que o granito natural tipo Caju tem um custo 1,2 vezes maior/m<sup>2</sup> comparado ao Compósito com resina Poliéster, é 1,25 vezes menor/m<sup>2</sup> que o Compósito desenvolvido com resina Acrílica. O custo do mármore Branco chega até a marmoraria por R\$ 75,00/m<sup>2</sup>. Nestes casos o Compósito com resina Acrílica e mineral mármore teria um custo 1,2 vezes maior/m<sup>2</sup> e com resina Acrílica 1,8 vezes maior pó metro quadrado.



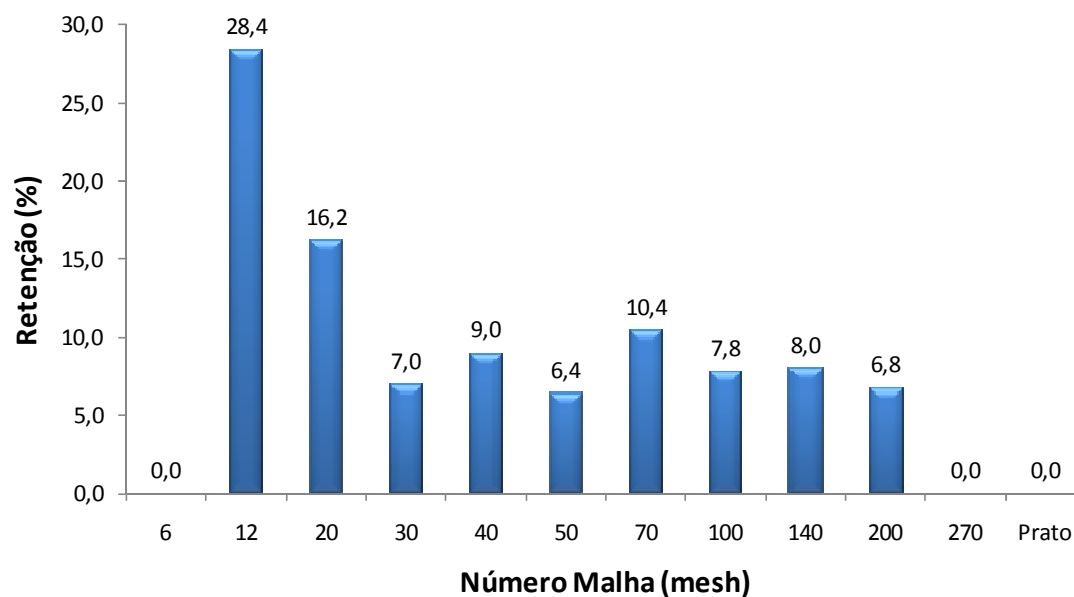
## APÊNDICE - G

### 1 Ensaio de Distribuição Granulométrica das Partículas da Pedra 1

As Tabelas G.1, G.2 e G.3 e Figuras G.1, G.2 e G.3 apresentam os resultados do ensaio de distribuição granulométrica realizado com as partículas minerais obtidas ao final do ensaio de teor de cinzas das amostras nº1, nº2 e nº3 da pedra sintética – Pedra 1, respectivamente.

**Tabela G.1.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 1 da pedra sintética - Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.

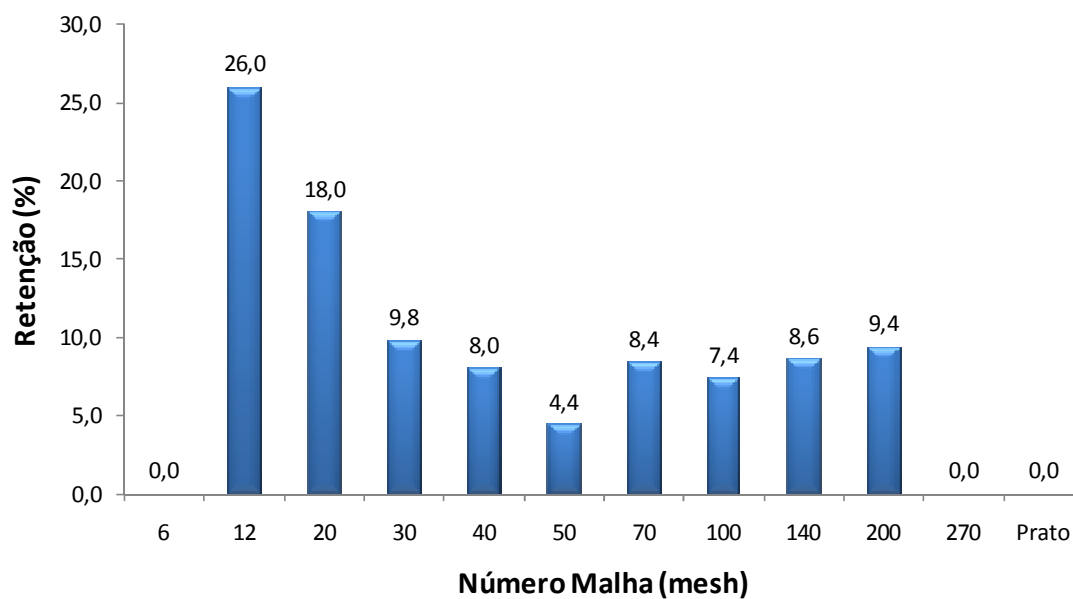
Malha (mm)	Nº malha (mesh)	Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + mármore	Retenção (g)	Retenção (%)
3,360	6	385	385,0	0,0	0,0
1,680	12	438	452,2	14,2	28,4
0,840	20	407	415,1	8,1	16,2
0,590	30	339	342,5	3,5	7,0
0,420	40	326	330,5	4,5	9,0
0,297	50	324	327,2	3,2	6,4
0,210	70	319	324,2	5,2	10,4
0,149	100	304	307,9	3,9	7,8
0,105	140	300	304,0	4,0	8,0
0,074	200	300	303,4	3,4	6,8
0,053	270	296	296,0	0,0	0,0
	Prato	378	378,0	0,0	0,0
<b>Soma</b>				<b>50</b>	<b>100</b>



**Figura G.1.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 1 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.

**Tabela G.2.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 2 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.

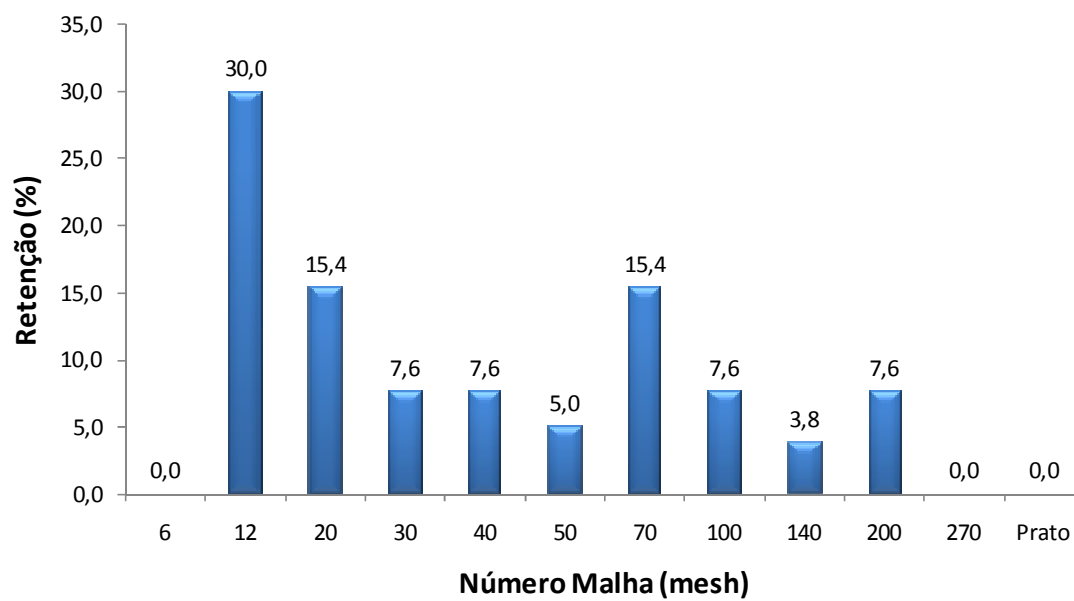
Malha (mm)	Nº malha (mesh)	Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + mármore	Retenção (g)	Retenção (%)
3,360	6	385	385,0	0,0	0,0
1,680	12	438	451,0	13,0	26,0
0,840	20	407	416,0	9,0	18,0
0,590	30	339	343,9	4,9	9,8
0,420	40	326	330,0	4,0	8,0
0,297	50	324	326,2	2,2	4,4
0,210	70	319	323,2	4,2	8,4
0,149	100	304	307,7	3,7	7,4
0,105	140	300	304,3	4,3	8,6
0,074	200	300	304,7	4,7	9,4
0,053	270	296	296,0	0,0	0,0
	Prato	378	378,0	0,0	0,0
<b>Soma</b>				<b>50</b>	<b>100</b>



**Figura G.2.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 2 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.

**Tabela G.3.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra nº 3 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.

Malha (mm)	Nº malha (mesh)	Peso peneira vazia (g)	Peso peneira + mármore	Retenção (g)	Retenção (%)
3,360	6	385	385,0	0,0	0,0
1,680	12	438	453,0	15,0	30,0
0,840	20	407	414,7	7,7	15,4
0,590	30	339	342,8	3,8	7,6
0,420	40	326	329,8	3,8	7,6
0,297	50	324	326,5	2,5	5,0
0,210	70	319	326,7	7,7	15,4
0,149	100	304	307,8	3,8	7,6
0,105	140	300	301,9	1,9	3,8
0,074	200	300	303,8	3,8	7,6
0,053	270	296	296,0	0,0	0,0
	Prato	378	378,0	0,0	0,0
Soma				50	100



**Figura G.3.** Distribuição granulométrica das partículas minerais da amostra n° 3 da pedra sintética – Pedra 1 resultante do ensaio de teor de cinzas.